COUNTWAY LIBRARY
HC 52CQ V

HANS SCHULZ

DAS SEHEN

Eine Einführung in die physiologische Optik

FERDINAND ENKE IN STUTTGART

BOSTON MEDICAL LIBRARY
PURCHASED FROM THE INCOME OF THE
SAMUEL WHEELER WYMAN
MEMORIAL FUND

DAS SEHEN

EINE EINFÜHRUNG IN DIE PHYSIOLOGISCHE OPTIK

Digitized by the Internet Archive
in 2025

https://archive.org/details/dasseheneineeinf0000unse

DAS SEHEN

EINE EINFÜHRUNG IN DIE PHYSIOLOGISCHE OPTIK

VON

DR. HANS SCHULZ

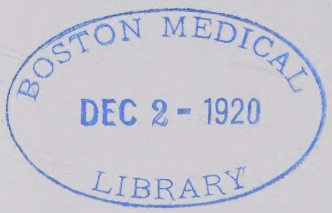
PRIVATDOZENT AN DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE
CHARLOTTENBURG

MIT 86 TEXTABBILDUNGEN

VERLAG VON FERDINAND ENKE IN STUTTGART
1920

28.6 183

18515-Hy



Hoffmannsche Buchdruckerei Felix Krais Stuttgart.

Vorwort.

Mehrfach sind mir im Anschluß an meine Vorträge über Abschnitte der physiologischen Optik von Hörern Wünsche geäußert worden, dahingehend, daß ich in mäßigem Umfange diese seit einiger Zeit ein größeres Interesse beanspruchenden Fragen behandeln möchte. Das Anwendungsgebiet dieses Teiles der Optik ist recht groß. Bei fast allen Messungen, und sei es auch an letzter Stelle, wird das Auge für die Registrierung der Meßergebnisse benutzt und es ist infolgedessen der Einfluß rein physiologischer Fehler in den meisten Fällen zu berücksichtigen. Will der Naturwissenschaftler und der Techniker sich über die objektiv erreichbare Genauigkeit ein Urteil bilden, so muß er sich also über Leistung und Grenzen der Leistungsfähigkeit des Auges klar sein. Aber auch für den Arzt wird eine Zusammenfassung der physikalisch darstellbaren Grundlagen des Sehvorganges erwünscht sein. Um noch einen Punkt zu erwähnen: Der Streit um die Bedeutung und den Wert der Goetheschen Farbentheorie, der über Schopenhauer, Hering, Helmholtz und Ostwald, um nur einige der bedeutendsten Namen zu nennen, bis in die neueste Zeit fortgesetzt worden ist, dürfte zur Genüge zeigen, daß, auch über die rein naturwissenschaftlichen Gebiete hinaus, die physiologische Optik noch Anwendung finden kann. Die Farbenlehre als Zweig der physiologischen Optik ist Gegenstand zahlreicher Abhandlungen in der Literatur über Kunst gewesen.

Trotzdem könnte es überflüssig erscheinen, nachdem noch 1910 eine Neuauflage des klassischen Werkes von H. v. Helmholtz herausgegeben ist, durch ein neues Buch die Zahl der trotz der Papiernot in Deutschland bereits überreichlich erscheinenden Bücher um ein weiteres zu vermehren. Abgesehen davon aber, daß der Umfang des Hauptwerkes zu groß ist, um es zur Einführung verwenden zu können, muß noch berücksichtigt werden, daß seither eine Anzahl wichtiger Untersuchungen durchgeführt worden ist, welche eine Anzahl bisher ungelöster Fragen ihrer Beantwortung näher bringen. Aber auch die „Physiologische Optik, dargestellt für Naturwissenschaftler“ von Dr. W. E. Pauli und Dr. R. Pauli, Jena 1918, erschien mir wenig geeignet, zumal eine Anzahl von

Fehlern, nicht nur in den Zahlenwerten, unbefangene Leser in Verwirrung setzen mußte, anstatt ihnen Klarheit zu bringen. Ich habe mich daher entschlossen, die Bearbeitung durchzuführen, wobei ich besonderen Wert auf die neuesten Anwendungsgebiete der physiologischen Optik gelegt und auch versucht habe, die noch nicht in den vorliegenden Werken berücksichtigte Literatur anzugeben. Auf Vollständigkeit kann schon mit Rücksicht auf den begrenzten Raum kein Anspruch gemacht werden.

Den Firmen Optische Anstalt C. P. Goerz A.-G., Berlin-Friedenau, Hahn-Cassel und Beller und Fischer-Stuttgart bin ich für Überlassung von Zeichnungen und Druckstöcken dankbar; besonders aber möchte ich dem Verlag Enke meinen Dank aussprechen für die Bereitwilligkeit, mit der alle meine Wünsche bezüglich Ausstattung des Werkchens erfüllt worden sind.

Berlin-Lichterfelde, Juli 1920.

H. Schulz.

Inhalt.

Abschnitt I.

Das Auge als optischer Apaprat.

Seite

§ 1. „Licht“ und Lichtempfindung 1
§ 2. Grundgesetze der Lichtfortpflanzung 4
§ 3. Abbildung durch Linsen 6
§ 4. Selbstleuchtende und nichtselbstleuchtende Körper 10
§ 5. Der Bau des Auges 11
§ 6. Nahpunkt und Fernpunkt, Akkommodation 15
§ 7. Brechungsanomalien 17
§ 8. Bestimmung der Brillengläser 20

Abschnitt II.

Die Netzhaut.

§ 9. Die Ausbreitung des Sehnerven 23
§ 10. Der blinde Fleck 26
§ 11. Weitere Ursachen der Reizung 27
§ 12. Die Nervenbahnen zum Gehirn 28

Abschnitt III.

Die Lichtempfindungen.

§ 13. Farben und Formen 29
§ 14. Fechnersches Gesetz 30
§ 15. Adaptation 31
§ 16. Örtliche Unterschiede der Empfindlichkeit der Netzhaut 35
§ 17. Hell- und Dunkelspektrum 38
§ 18. Purkinjesches Phänomen 42
§ 19. Photometrische Grundgesetze 42
§ 20. Photometrische Empfindlichkeit 42
§ 21. Vergleich verschiedenfarbiger Lichtquellen 48
§ 22. Objektive Photometrie 49

Abschnitt IV.

Die Sehschärfe.

§ 23. Das Auflösungsvermögen 53
§ 24. Die Abhängigkeit des Auflösungsvermögens von der Helligkeit und dem Netzhautort 55
§ 25. Noniensehschärfe 58
§ 26. Bedeutung der Sehschärfengröße für die messende Physik 59
§ 27. Die ärztliche Bestimmung der Sehschärfe 61
§ 28. Sehschärfe und Akkommodation 63

Abschnitt V.

Die Farbenempfindungen.

Seite

§ 29. Die Spektralfarben 65
§ 30. Die Körperfarben 70
§ 31. Die Theorien des Farbensehens 73
§ 32. Nachbilder und Kontrastfarben 77
§ 33. Die Photographie in natürlichen Farben 82
§ 34. Farbenmisch- und Meßapparate 85
§ 35. Physische und psychische Wirkungen der Strahlung 88

Abschnitt VI.

Die zeitliche Änderung der Reize.

§ 36. Ansteigen und Abklingen der Lichtempfindung. Das Talbotsche Gesetz . 91
§ 37. Die Auffassung von Bewegungsvorgängen; Kinematographie 94
§ 38. Schwellenwerte der Bewegungsgrößen 99

Abschnitt VII.

Räumliches Sehen.

§ 39. Monokulares und binokulares Sehen 101
§ 40. Stereoskopische Bilder 106
§ 41. Erweiterung der Grenzen des Sehens 111
§ 42. Die binokularen Instrumente 115
§ 43. Stereoskopische Meßverfahren 117
§ 44. Objektive Wiedergabe stereoskopischer Bilder 121
§ 45. Die Helligkeit optischer Instrumente 123
§ 46. Die Theorien des räumlichen Sehens 126

Abschnitt VIII.

Optische Täuschungen.

§ 47. Täuschungen des Augenmaßes 130
§ 48. Gestalts- und Raumtäuschungen 135

Sachverzeichnis 141
Quellenwerke 144

DEC 2 - 1920

Abschnitt I.

Das Auge als optischer Apparat.

§ 1. „Licht“ und Lichtempfindung.

In verwirrender Fülle bieten sich tagaus, tagein die Eindrücke der Außenwelt den Sinnen dar, am unmittelbarsten dem Auge. Die von ihm dem Gehirn übermittelten Reize stellen ein Bild der äußeren Vorgänge dar, welches nicht in allen Einzelheiten den erregenden Ursachen entspricht; die Gesichtseindrücke weichen, ebenso auch die übrigen Sinneswahrnehmungen, wie bei geeignet gewählten Beobachtungsbedingungen erkannt werden kann, von dem, was dem Verstande nach als richtig zu betrachten ist, sehr oft ab. Es ist sogar nicht immer unzweifelhaft feststellbar, was die äußere Ursache ist, die die Erregung des Auges veranlaßt. Gleichgültig aber, welcher Art die Einwirkung ist, wird jeder Reiz des Auges als „Licht“ empfunden. Es ist wichtig, diesen nur auf die Empfindungen bezüglichen Begriff „Licht“ von dem für die äußeren als Ursache der Lichtempfindung vorwiegend in Betracht kommenden Naturvorgänge geltenden streng zu unterscheiden. Leider werden auch diese physikalisch erfaßbaren, meßbaren Vorgänge im Sprachgebrauche als „Licht“ bezeichnet, so daß der Doppelsinn des Wortes häufig zu Verwechslungen Anlaß geben kann und in der Tat auch gegeben hat. Um diesen Mangel, soweit möglich, zu vermeiden, soll im folgenden das Wort „Licht“ für die physiologischen Empfindungen benutzt werden, während die physikalische Erregungsursache, insofern sie, wie es meist der Fall ist, die von Lichtquellen ausgesandte Energie ist, als Strahlung oder strahlende Energie bezeichnet werden soll.

Da für die Empfindungen keine zahlenmäßige Größenangabe möglich ist, sondern nur Verhältniswerte, wie gleich, größer oder kleiner, stärker oder schwächer, empfunden werden, so kann es sich beim Sehen nur darum handeln, wenn zahlenmäßige Bestimmungen erfolgen sollen, festzustellen, wann zwei verschiedene Ursachen gleiche Reize bewirken und welche Unterschiede äußerer Vorgänge vorhanden sein müssen, um noch als verschieden empfunden zu werden. Deshalb ist es nötig, die Gesetze

der Strahlung wenigstens soweit darzulegen, daß die bis zum Zustandekommen der Nervenreize eintretenden Veränderungen ihrer Größe nach angegeben werden können.

Wird ein Stein in ein Gewässer geworfen, dessen Oberfläche ruhig ist, so wird ein Teil seiner Bewegung auf die Wasserteilchen übertragen und breitet sich in Form von kreisförmigen Wellen von der Störungsstelle nach allen Richtungen aus, wobei die Wasseroberfläche regelmäßige Erhöhungen und Vertiefungen aufweist. In ähnlicher Weise wird von den Strahlern (Lichtquellen) ein Teil der in Form von Brennstoffen (Verbrennungswärme) oder elektrischem Strom zugeführten Energie als Strahlung ausgesandt, die aber nun nicht allein eine einzige Wellenbewegung darstellt, sondern eine Reihe verschiedenartiger, die auch ganz verschiedene Wirkungen auslösen. Es ist bekannt, daß jede Lichtquelle, sei es eine einfache Kerze oder eine elektrische Bogenlampe, Wärme ausstrahlt, daß durch die ausgesandte Energie aber auch das Silbersalz in photographischen Platten verändert wird. Ein bestimmter, in den meisten Fällen allerdings sehr kleiner Teil der von den Lichtquellen ausgesandten Strahlung ist imstande, die Nervenfasern des Auges zu erregen, und dieser Teil der Strahlung, der physikalisch genau den gleichen Gesetzen unterworfen ist, wie die gesamte von der Lichtquelle ausgehende Wellenbewegung, ist es, der als Lichtstrahlung bezeichnet wird.

Sie breitet sich mit der ungeheuren Geschwindigkeit von 300 000 km in der Sekunde im leeren Raume aus. Als Träger dieser Bewegung wird ein außerordentlich feiner Körper, der Lichtäther, angenommen, der das ganze Weltall erfüllt und der ebenso in den kosmischen, von wägbaren Stoffen nahezu freien Räumen zwischen den Weltkörpern vorhanden ist, wie auch in den grobsinnlich wahrnehmbaren Körpern selbst, die aus sehr kleinen Teilchen von angebbarer endlicher Größe (den Atomen) bestehen, zwischen denen sich selbst bei festen Körpern noch Lücken befinden. Die Atome der wägbaren Stoffe beeinflussen die Lichtausbreitung in der Weise, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Strahlung verringert wird, und zwar nimmt sie mit zunehmender optischer Dichte ab. Das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten im freien Äther und im wägbaren Körper ist eine für den jeweils betrachteten Stoff konstante Größe, die als Brechungsverhältnis bezeichnet wird. Ihr Wert liegt meist zwischen 1 und 2.

Huygens, der Begründer der Wellentheorie des Lichtes, faßte die Lichtfortpflanzung als einen rein mechanischen Vorgang auf und betrachtete die von leuchtenden Körpern ausgehenden Wellen als elastische Schwingungen ähnlicher Art, wie sie bei tönenden Saiten von Musikinstrumenten vorliegen. Er konnte damit, das Vorhandensein des Lichtäthers vorausgesetzt, mit dem Vorgange der Lichtausbreitung eine anschauliche Vor-

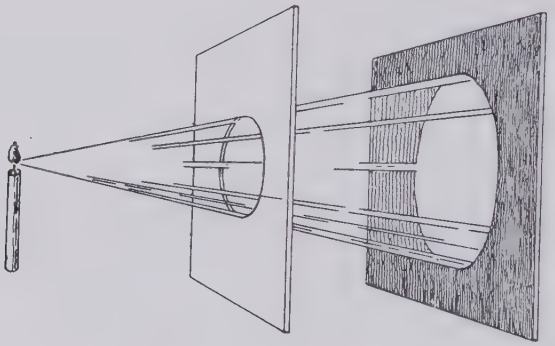
stellung verbinden. Bei den Wasserwellen, die ebenfalls elastische Schwingungen sind, läßt sich auch die Möglichkeit des gleichzeitigen Fortschreitens mehrerer Wellen unmittelbar beobachten. Auf den größeren Wellen, wie sie beispielsweise von einem Dampfer erzeugt werden, schreiten kleinere Wellen fort, bei denen der Abstand der Erhebungen, der als Wellenlänge bezeichnet wird, kleiner ist. Während nun bei den Wasserwellen die Länge zwischen einigen Zentimetern und einigen Metern wechselt, liegen die Wellenlängen der von leuchtenden Körpern ausgehenden Strahlung in einem Gebiet, das von 0,0002 mm bis etwa 0,3 mm geht, von denen jedoch nur ein sehr kleiner Teil, wie schon erwähnt, auf das Auge wirkt. Als eigentliche Lichtwellen sind nur die Schwingungen von 0,0004 bis 0,0007 mm Wellenlänge zu betrachten; die kürzeren Wellen üben eine vorwiegend chemische Wirkung aus, die längeren Wärmewirkungen, die auch von den Hautnerven empfunden werden. Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen, die in der drahtlosen Telegraphie eine praktische Verwendung gefunden haben, und die experimentelle Erforschung der Gesetze, nach denen ihre Ausbreitung erfolgt, gab eine Bestätigung der schon vorher gemachten Annahme, daß auch die von leuchtenden Körpern ausgehende Strahlung elektromagnetischer Natur sei: geradlinige Ausbreitung, Zurückwerfung an spiegelnden Flächen, Richtungsänderung beim Eintritt in einen anderen Körper (Brechung) und andere Erscheinungen finden für Lichtwellen wie für elektromagnetische Wellen in gleicher Weise statt, auch konnte gezeigt werden, daß für beide die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Raume die gleiche ist. Die elektromagnetische Lichttheorie, von Faraday und Maxwell begründet, gibt ein einheitlicheres Weltbild und ist auch imstande, die Beziehungen zwischen der Strahlung leuchtender Körper und elektromagnetischen Vorgängen zu erklären; sie läßt aber, namentlich in ihrer neueren Entwicklung, die Anschaulichkeit vermissen. Es wird daher im folgenden, da für das hier in Frage kommende Gebiet die Huygensche Betrachtungsweise die gleichen Folgerungen ergibt, wie die elektromagnetische Lichttheorie, nur die erstere herangezogen werden. Ob die die Gesichtsempfindungen auslösende Einwirkung eine elektromagnetische ist, wie es bei den auf längere elektrische Wellen ansprechenden Empfangsapparaten der drahtlosen Telegraphie der Fall ist, oder ob durch die Lichtstrahlung chemische Prozesse im Auge eingeleitet werden, ist bislang nicht mit Sicherheit festzustellen. Es genügt zunächst die Tatsache, daß ein ursächlicher Zusammenhang zwischen den außerhalb des Auges objektiv vorhandenen Schwingungen einerseits und den Lichtempfindungen andererseits vorhanden ist. Beachtet werden muß aber, daß wohl beim Einwirken der strahlenden Energie bestimmter Wellenlängen stets Lichtempfindung im Auge hervorgerufen wird, daß aber umgekehrt die Lichtempfindung nicht immer durch Lichtwellen

verursacht wird. Druck auf das Auge, elektrische Ströme, Einwirkung von Radiumstrahlung, sowie chemische Reizungen der Augennerven bewirken ebenfalls Lichtempfindung.

§ 2. Grundgesetze der Lichtfortpflanzung.

Unabhängig von besonderen Ausnahmen über das Wesen des Lichtes lassen sich die rein geometrischen Gesetze der Lichtfortpflanzung entwickeln mit Hilfe von Näherungsgesetzen, die aus den hypothetischen Voraussetzungen ableitbar sind oder als Erfahrungstatsachen der Beobachtung leicht entnommen werden können. Für den Abbildungsvorgang kommen die einfachen Gesetze der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes, der Unabhängigkeit der einzelnen Teile eines Lichtbündels voneinander und die Gesetze der Reflexion und der Brechung in Frage. Versteht man

Bild 1.



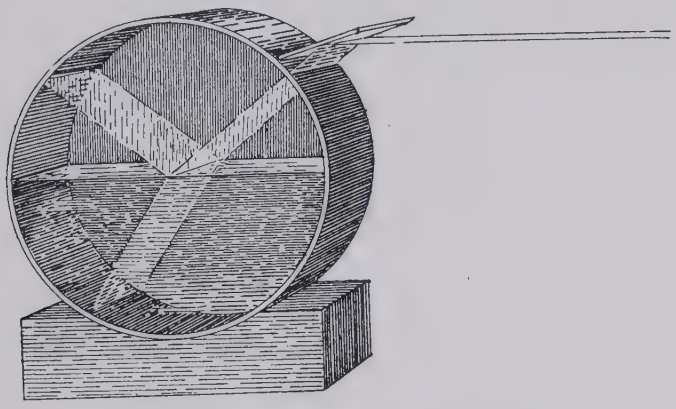
unter „Lichtstrahl“ die gerade Linie, längs deren die Wellenbewegung des Lichtes fortschreitet und bezeichnet man als „leuchtenden Punkt“ ein sehr kleines Stück der Oberfläche eines leuchtenden Körpers, so lassen sich die Vorgänge bei der Abbildung mit Hilfe dieser Begriffe sehr einfach darstellen, wobei jedoch zu beachten ist, daß ein einzelner leuchtender Punkt ebensowenig zu verwirklichen ist, wie ein einzelner Lichtstrahl.

Befindet sich in einer gewissen Entfernung von einer punktförmigen Lichtquelle (Bild 1) ein lichtundurchlässiger Schirm mit einer kreisförmigen Öffnung, so wird auf einem zweiten Schirm ein je nach seiner Entfernung größerer oder kleinerer Lichtfleck entstehen, dessen Begrenzung man erhält, wenn man von der Lichtquelle aus gerade Linien zu der Begrenzung der Öffnung im ersten Schirm zieht und diese bis zum zweiten Schirm verlängert. Ist hierdurch das Gesetz der geradlinigen Fortpflanzung bewiesen, so zeigt sich bei Verkleinerung der Öffnung des ersten Schirmes durch ein zwischengeschaltetes Pappstück, daß jeder Teil der Öffnung den ihm zugeordneten Teil des Lichtfleckes auf dem zweiten Schirm beleuchtet, und daß somit die einzelnen Teile des von der Lichtquelle ausgehenden Strahlenbündels

in ihrem Verlaufe und ihrer Wirkung als unabhängig voneinander zu betrachten sind. Würde man versuchen, aus dem Strahlenbündel durch eine sehr kleine Blende einen „Strahl“ auszublenden, so ist der Lichtfleck auf dem zweiten Schirme größer, als aus der geometrischen Konstruktion folgt; das Gesetz der geradlinigen Fortpflanzung ist also nur bei endlichem Durchmesser eines Strahlenbündels gültig. Eine Anwendung des Begriffes „Lichtstrahl“ wird also nur dann zulässig sein, wenn man sich den Lichtstrahl innerhalb eines Bündels von größerem Querschnitt verlaufend denken kann.

Unter diesen Einschränkungen läßt sich nun die an der Grenzfläche zweier Körper auftretende Richtungsänderung eines Strahlenbündels so

Bild 2.



ausdrücken: Jeder auf die Grenzfläche auffallende Strahl wird in einen reflektierten (zurückgeworfenen) und einen gebrochenen Strahl zerlegt, die beide in der Ebene (Einfallsebene) verlaufen, die durch den einfallenden Strahl und das Lot geht, welches im Einfallspunkte auf der Grenzfläche errichtet ist (Bild 2). Der zurückgeworfene Strahl bildet mit dem Einfallslot den gleichen Winkel, wie der einfallende Strahl; der Winkel des gebrochenen Strahles mit dem Einfallslot wird durch das Brechungsgesetz bestimmt, das für kleine Winkel die Form hat: Der Einfallswinkel verhält sich zum Brechungswinkel, wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im ersten Körper zu der im zweiten, oder das Verhältnis von Einfalls- und Brechungswinkel ist gleich dem Brechungsverhältnis [1]).

[1]) Streng und in mathematischer Fassung lautet das Brechungsgesetz

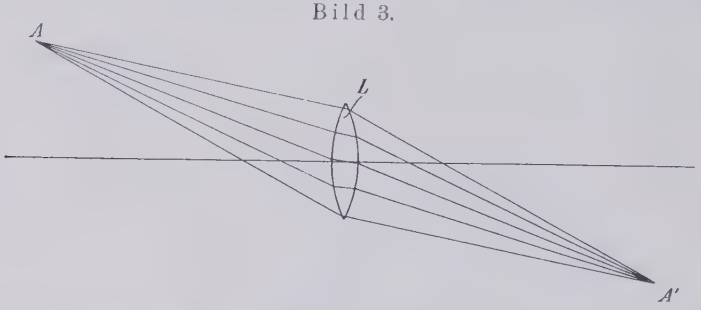
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_b}{n_a},$$

wobei α den Einfallswinkel, β den Brechungswinkel, und n_a, n_b die Brechungsindizes der Körper a und b darstellen. Als Brechungsindex wird das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeit im leeren Raum zu der im Körper selbst bezeichnet.

§ 3. Abbildung durch Linsen.

Die Anwendung dieses Brechungsgesetzes auf die Richtungsänderung der Lichtstrahlen beim Auftreffen auf Kugelflächen zeigt nun, daß alle Strahlen, die von einem leuchtenden Punkte herkommen, wieder in einem Punkte vereinigt werden, wenn sie durch eine solche hindurchgehen, oder daß ihre Richtungsänderung wenigstens derart ist, daß sie nach der Brechung von einem Punkte herzukommen scheinen. Da nun einzelne Kugelflächen

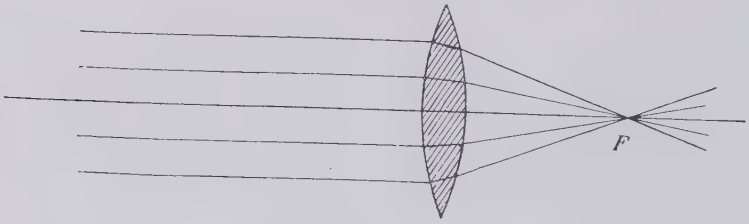
Bild 3.



seltener vorkommen, sollen hier nur in Kürze die Vorgänge bei einem von zwei Kugelflächen begrenzten Stück eines durchsichtigen Körpers, einer sog. Linse, betrachtet werden.

Ist in Bild 3 L die von zwei Kugelflächen begrenzte Sammellinse, deren Dicke so gering sein soll, daß sie gegen die Krümmungsradien vernachlässigt werden kann (unendlich dünne Linse), so werden

Bild 4.

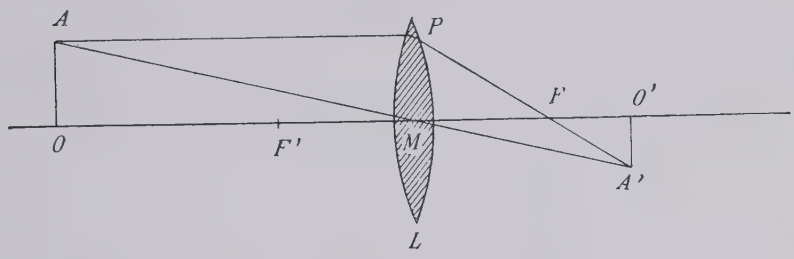


die von dem leuchtenden Punkte A ausgehenden Strahlen nach dem Durchgang in ihrer Fortpflanzungsrichtung so verändert sein, daß sie in A' zusammenlaufen und hier ein Bild des leuchtenden Punktes erzeugen, das auf einem weißen Schirm aufgefangen werden kann: der gleiche Vorgang, der bei den photographischen Apparaten benutzt wird, um mit der Mattscheibe feststellen zu können, ob das von dem Objektiv erzeugte Bild des aufzunehmenden Gegenstandes scharf und in passender Größe sich ergibt. Ist eine bestimmte Linse vorausgesetzt, so hängt Ort und Größe des Bildes von der Entfernung des leuchtenden Körpers von der Linse ab. Ist der abzubildende Gegenstand sehr weit entfernt, wie

die Sonne, so daß alle von ihm ausgehenden Strahlen parallel zur Achse der Linse (der Verbindungslinie der Kugelmittelpunkte) verlaufen, so gehen alle Strahlen durch einen Punkt F (Bild 4), den man den hinteren Brennpunkt der Linse nennt und der nun zur Ermittlung des Bildortes und der Bildgröße dienen kann, wenn außerdem beachtet wird, daß der durch die Mitte M der Linse verlaufende Strahl unabgelenkt weiter geht.

Ist A (Bild 5) wieder ein leuchtender Punkt, L die Linse, so geht also der parallel der Achse OO' verlaufende Strahl AP nach dem Durchgang durch die Linse durch den Brennpunkt F, der durch die Mitte M gehende Strahl dagegen ungebrochen weiter. Der Schnittpunkt A' beider Strahlen ist der Ort des Bildes, weil, wenn zwei Strahlen durch diesen Punkt gehen, auch alle übrigen durch ihn verlaufen müssen. Das Bild des von A auf OO' gefällten Lotes wird dann in A'O' entstehen, und endlich wird die durch A senkrecht zu AO gelegte Ebene in der durch A' senkrecht zu OO' gelegten Ebene abgebildet werden. Alle Ebenen,

Bild 5.



die zwischen der durch A gelegten Ebene und dem vorderen Brennpunkt F'[1]) senkrecht zu OO' liegen, werden, wie aus der angegebenen Konstruktion zu entnehmen ist, rechts von der durch A' gelegten Ebene abgebildet werden, alle links von der durch A gelegten Ebene befindlichen, ihr parallelen Ebenen, werden zwischen F und O' senkrecht zur Achse liegende Ebenen als Bilder haben. Die Bildgröße A'O' verhält sich dabei zur Gegenstandsgröße AO wie die Strecke O'M zu der Strecke OM. Setzt man

$$AO = y$$
$$A'O' = y'$$
$$OM = s$$
$$O'M = s'$$
$$MF = MF' = f,$$

[1]) Der vordere Brennpunkt wird erhalten, wenn man von rechts kommende, achsenparallel auf die Linse auftreffende Strahlen durch die Linse zur Vereinigung bringt. Für unendlich dünne Linsen ist MF = MF', wenn rechts und links von der Linse das gleiche Medium vorhanden ist.

so bestehen folgende Beziehungen, die zur rechnerischen Ermittlung von Bildlage und Bildgröße dienen können:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \qquad 1)$$

$$\frac{y}{s} = \frac{y'}{s'} \qquad 2)$$

Setzt man beispielsweise $f = 10$ cm, $s = 50$ cm und $y = 5$ cm, nimmt also einen leuchtenden Gegenstand von 5 cm Größe an, so wird

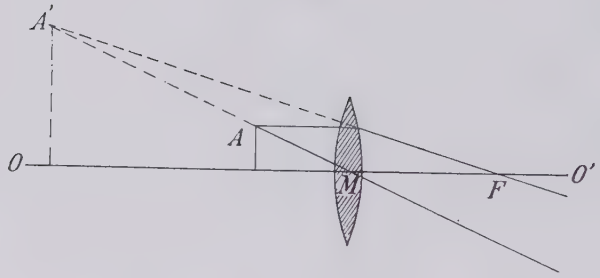
$$\frac{1}{50} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{10}$$

$$\mathbf{s' = 12{,}5\ cm}$$

$$\frac{y'}{12{,}5} = \frac{5}{50}$$

$$\mathbf{y' = 1{,}25\ cm.}$$

Bild 6.



Es entsteht also ein Bild von 1,25 cm Größe in 12,5 cm Entfernung von M.

Liegt der abzubildende Gegenstand zwischen Brennpunkt und Linse, so ist die sammelnde Kraft der Linse nicht mehr groß genug, um die Strahlen nach der Brechung wieder zu vereinigen. In diesem Falle werden die Strahlen so gebrochen, daß sie von einem auf der gleichen Seite der Linse gelegenen Bilde herzukommen scheinen, das nun, da es nicht mehr auf einem Schirme aufgefangen werden kann, als virtuelles Bild bezeichnet wird, im Gegensatz zu den oben beschriebenen reellen Bildern (Bild 6). Die Bezeichnungen in Bild 6 entsprechen denen in Bild 5. Die Größenbezeichnungen 1) und 2) gelten auch für diesen Fall.

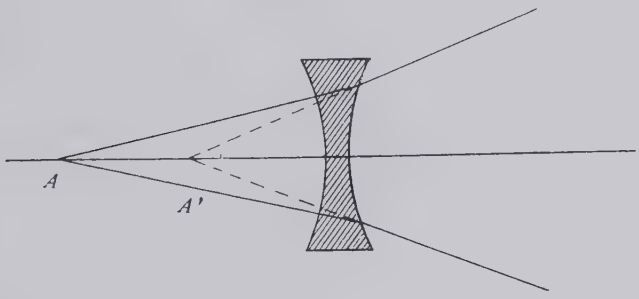
Negatives Vorzeichen der Bildweite s' bedeutet, daß das Bild links von der Linse liegt.

Haben die Linsen andere Gestalt, so ändert sich dadurch die Brennweite f. Mit stärkerer Krümmung der Flächen und größerem Brechungsvermögen des Linsenmateriales wird die Brennweite kleiner. Liegen die

begrenzenden Kugelflächen endlich so, daß die Mitte der Linse dünner ist als der Rand, so werden die Strahlen nicht mehr gesammelt, sondern zerstreut, wie es Bild 7 andeutet. Die für Zerstreuungslinsen gültigen Größenbeziehungen gehen aus den oben angegebenen hervor, wenn man die Brennweite negativ setzt, es folgt also

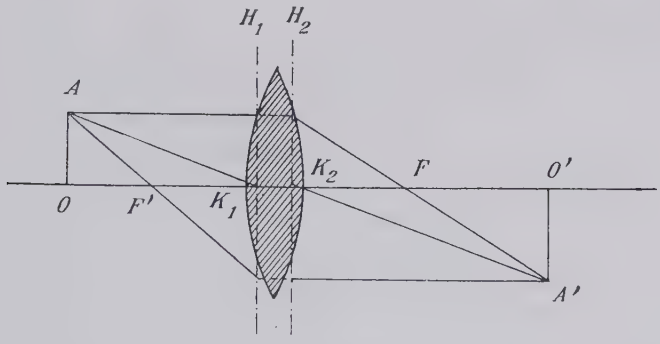
$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = -\frac{1}{f}.$$

Bild 7.



Die abgeleiteten Gesetze der Abbildung gelten nur für Linsen, deren Mitteldicke klein ist (unendlich dünne Linsen) und für Strahlen, deren Neigung zur Achse einen bestimmten kleinen Wert nicht überschreitet.

Bild 8.



Will man zunächst dickere Linsen einschließen, so muß die Konstruktion in anderer Weise durchgeführt werden. Es sind für jede Linse zwei senkrecht zur Achse liegende Ebenen vorhanden, die die Eigenschaft haben, daß ein beliebiger Strahl beide Ebenen im gleichen Abstand von der Achse der Linse durchsetzt (Bild 8). Diese Hauptebenen H_1 und H_2, deren Abstand für unendliche dünne Linsen verschwindet, ermöglicht es also, die Konstruktion in gleicher Weise durchzuführen wie früher; der Strahl, dessen Neigung beim Durchgang durch die Linse nicht ver-

ändert wird, erleidet aber in diesem Falle eine Parallelverschiebung, schneidet also die Achse in zwei Punkten K_1 und K_2, die als Knotenpunkte bezeichnet werden. Auf die durch die größere Neigung bedingten Fehler der Abbildung soll an anderer Stelle eingegangen werden (S. 13).

§ 4. Selbstleuchtende und nichtselbstleuchtende Körper.

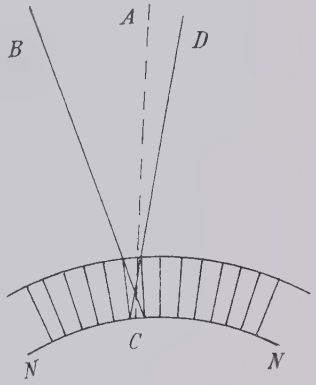
Wir haben bisher vorausgesetzt, daß die abzubildenden Gegenstände Strahlen aussenden, deren Richtungsänderung die Abbildung verursachte. Daß dies bei glühenden Körpern der Fall ist, ist bekannt. Benutzen wir doch diese Selbstleuchter, um die Nacht zu erhellen und wenigstens in bescheidenem Maße die große Licht- und Lebensspenderin Sonne zu ersetzen. Die ältesten Lichtquellen nutzten die in den Brennstoffen vorhandene chemische Energie aus, um Kohlenstoffteilchen zum Glühen zu bringen. Bei ihnen, mögen es nun Fackeln, Öllampen oder Kerzen sein, wird nur ein verschwindend kleiner Teil der gesamten Energie an Lichtempfindung umgesetzt. Die vom Auge aufgenommene Energiemenge ist weniger als $\frac{1}{50000}$ der ausgestrahlten Gesamtmenge. Die neueren Lichtquellen, bei denen zur Erzeugung der zum Leuchten nötigen Temperatur der elektrische Strom benutzt wird, oder bei denen wenigstens die Verbrennungswärme besser ausgenutzt wird, geben schon bedeutend mehr Energie in Form sichtbarer Strahlung ab, und zwar bei Metallfadenlampen etwa $\frac{1}{200}$, während bei der Sonne nahezu $\frac{1}{6}$ der gesamten Strahlung zur Erregung der Lichtempfindung dient.

Nun wird aber, wie oben erwähnt, an der Oberfläche der Körper, je nach ihrer Beschaffenheit, ein Teil der auffallenden Strahlung zurückgeworfen, so daß auch sie Lichtstrahlen in das Auge senden können. Alles Licht, das vom Monde zu uns gelangt, ist zurückgeworfene Sonnenstrahlung, „erborgtes Licht“. Diese Eigenschaft der Körper, die Strahlung von Selbstleuchtern zu zerstreuen, ermöglicht erst ihre Wahrnehmung. Je größer der Unterschied der Brechungsindizes zweier Körper ist, desto mehr strahlende Energie wird an ihrer Trennungsfläche zurückgeworfen, um so heller erscheinen sie. Taucht man einen Glasstab in ein Gefäß mit Benzol, so ist das eingetauchte Ende nur sehr schwer sichtbar, während es in Wasser oder gar in Luft infolge der stärkeren Zurückwerfung deutlich sichtbar ist. Es können also auch an sich nichtleuchtende Körper abgebildet werden und in den meisten Fällen ist es gleich gültig, welchen Ursprungs die von seiner Oberfläche ausgehenden Lichtstrahlen sind. Erst wenn es sich um die Feststellung seiner Eigenschaften, seiner Farbe handelt, muß die Beschaffenheit der auffallenden Lichtstrahlung berücksichtigt werden.

§ 5. Der Bau des Auges.

Während die langwelligen Strahlen leuchtender Körper in den Hautnerven Wärmeempfindung auslösen, setzt der schon gekennzeichnete Wellenlängenbereich von 0,0007 bis 0,0004 mm sich in bestimmten Nerven des tierischen Körpers in Lichtempfindung um. Bei niederen Tieren sind diese Nerven nicht in besonderen Organen vereinigt, die eine Unterscheidung der von verschiedenen äußeren Punkten herkommenden Lichtstrahlen ermöglichen, sondern sie sind auf die Körperoberfläche verteilt. Bei höher organisierten Lebewesen sind dagegen bestimmte Vorrichtungen vorhanden, die als Augen bezeichnet werden und die bei der Erregung der Nervenfasern durch das Licht eine Zuordnung der Empfindungseinzelheiten zu abgegrenzten Raumelementen zulassen. Wenn auch eine punktweise Abbildung in der Art, wie sie durch Linsen vermittelt wird, nicht immer erreicht wird, so ist doch eine mehr oder weniger genaue Abbildung der Aussenwelt vorhanden, die eine Richtungsunterscheidung ermöglicht, so bei Insekten und Krustazeen, die zusammengesetzte Augen haben.

Bild 9.



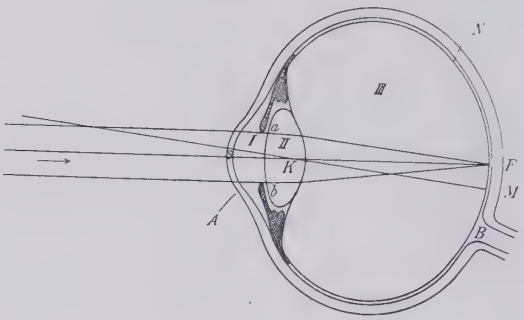
Bei diesen sitzen auf der durch Ausbreitung der Nervenendigungen entstehenden Netzhaut N—N (Bild 9) feine Kegel, deren Wandungen mit einer das Licht stark absorbierenden Farbschicht (Pigment) versehen sind. Auf die in der Basisfläche des Kegels befindlichen lichtempfindlichen Nervenenden können also nur solche Strahlen gelangen, die von Punkten A eines durch den Kegel BCD begrenzten Raumteiles ausgehen. Die von der Nervenhaut vermittelten Empfindungen geben ein Bild, das aus tausenden kleiner Flächen zusammengesetzt ist, wodurch je nach Zahl und Form der lichtsondernden Röhren eine größere oder geringere Erkennbarkeit von Formen und möglicherweise auch Farben gegeben ist.

Bei den Wirbeltieren, also auch beim Menschen erfolgt die Sonderung der Lichteindrücke in der Weise, daß zunächst eine Abbildung der Dinge der Außenwelt durch Linsen oder linsenähnliche Körper bewirkt wird. Ähnlich wie das Objektiv des photographischen Apparates auf der Mattscheibe ein Bild erzeugt, das nur auf der photographischen Platte festgehalten werden kann, entsteht im Auge ein Bild auf der flächenförmigen Ausbreitung des Sehnerven, auf der Netzhaut. Der Vorgang des Sehens ist also zu zerlegen in einen nach physikalischen Ge-

setzen erfolgenden Abbildungsvorgang und den Vorgang der Nervenerregung, der die physiologische Ursache der Lichtempfindung ist.

Das menschliche Auge (Bild 10) stellt einen nahezu kugelförmigen Körper dar, der von einer weißen, starken, sehnigen Haut, der Sklerotika, umgeben ist, die vorn einen etwas stärker gewölbten, durchsichtigen Teil, die Hornhaut oder Kornea S, aufweist, deren Krümmungsradius etwa 8 mm beträgt. An die etwa 1 mm dicke Hornhaut schließt sich die vordere Augenkammer I an, die durch die Linse II (auch Kristallinse genannt) nach hinten abgeschlossen ist. Dicht vor der Linse befindet sich die Regenbogenhaut (Iris, in Bild 10 schraffiert) mit einer nahezu kreisförmigen Öffnung, die den Querschnitt des in das Auge eintretenden Strahlenbündels begrenzt. Der Raum zwischen Linse und Hornhaut ist mit einer wäßrigen Flüssigkeit, dem Kammerwasser, von einem Brechungsverhältnis $n = 1{,}336$ ausgefüllt; die Dicke der Flüssigkeitsschicht

Bild 10.



ist etwa 3,6 mm. Die Linse von etwa 3,6 mm mittlerer Dicke hat vorn im Ruhezustande einen Radius von rund 10 mm, einen hinteren Radius von 6 mm und ist aus einzelnen Schichten zwiebelartig zusammengesetzt, wobei der Brechungsindex von außen nach innen zunimmt. An die äußere Kapsel der Linse sind Bänder angeheftet, die zur Befestigung und Formänderung der Linse dienen. Der eigenartige geschichtete Aufbau der Linse hat den Zweck, bei Anpassung an verschiedene Gegenstandsentfernungen, also bei Formänderung der Linse, die Hauptebenen und Knotenpunkte möglichst unverändert in ihrer Lage zu erhalten und eine möglichst fehlerfreie Abbildung zu erwirken. Dabei ist zu bemerken, daß die Schärfe der Abbildung bei der geschichteten Linse nicht wesentlich günstiger ist, als die einer einfachen, durchgängig aus dem gleichen Stoff bestehenden, von gleicher Brechkraft. Während der größte Brechungsindex in der geschichteten Linse (Kernindex) 1,4107 ist, hat man als Brechungsindex der wirkungsgleichen einfachen Linse 1,437 zu setzen. Es ist bereits oben darauf hingewiesen, daß die punktweise Abbildung nur

für geringe Strahlenneigung gültig ist. Für schräg durch eine Linse verlaufende Strahlen und ebenso für achsenparallele Strahlen, die in größerer Entfernung von der Achse die Linse durchsetzen, gelten diese einfachen Gesetze nicht mehr. Diese Strahlen gehen nicht mehr durch den als Bild bezeichneten Punkt F' des Bildraumes, sondern bewirken, daß an Stelle des punktförmigen Bildes eines leuchtenden Punktes eine Zerstreuungsfigur auf der Netzhaut entsteht, deren Durchmesser ein Maß für die Unschärfe abgibt.

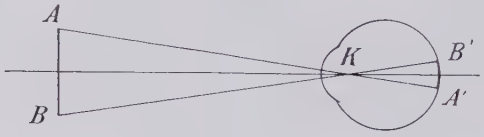
Anschließend an die Linse füllt den größeren Teil des Auges, der bei etwa 23—26 mm Durchmesser nach hinten eine geringe Abflachung zeigt, der Glaskörper (corpus vitreum, III) aus, dessen Brechungsindex mit etwa 1,336 dem des Kammerwassers nahezu gleichkommt. Zwischen dem Glaskörper und der Sklerotika befinden sich die Netzhaut N (Retina) als Ausbreitung des Sehnerven B und die für die Ernährung des Auges wichtige Aderhaut (Chorioidea), deren vorderster Teil als Iris in die vordere Augenkammer hineinragt.

Für eine einfache Übersicht kann man die Flächen des Auges als Kugelflächen annehmen, deren Mittelpunkte auf einer Geraden liegen, wenngleich Abweichungen von der Zentrierung und der Kugelgestalt auch beim normalen menschlichen Auge vorhanden sind. Eine Berücksichtigung aller Einzelheiten würde zu weit führen. Die Rechnung, gestützt auf die am lebenden Auge ermittelten Werte der Krümmungsradien, der Abstände und des Brechungsindizes, zeigt, daß die Abbildungsfehler des Auges nicht unerheblich sind. Da der Brechungsindex von Wellenlänge zu Wellenlänge, oder mit anderen Worten, von Farbe zu Farbe, wechselt, gibt sich bereits für die Abbildung äußerer Dinge vermittelst verschiedener Wellenlängen eine andere Größe der Brennweite und damit eine andere Lage des Bildortes selbst für die Strahlenarten, die räumlich den Bedingungen der punktweisen Abbildung genügen. Ferner ist die Strahlenvereinigung für die seitlich der Achse gelegenen Punkte selbst bei geringem Achsenabstand recht unzureichend. Überhaupt gilt der Satz, daß Ebenen wieder in Ebenen abgebildet werden nicht mehr. Die Bildfläche des Auges, das heißt, die Gesamtheit derjenigen Orte, in denen die schärfste Abbildung stattfindet, ist für das optische System des Auges der Flächenform der Netzhaut angepaßt, ist also nahezu kugelförmig. Mit den heutigen optischen Systemen, einem gut berechneten und ausgeführten photographischen Objektiv, läßt sich das normale menschliche Auge schon wegen der Verschiedenheit der geforderten Leistung hinsichtlich seines Korrektionszustandes gar nicht vergleichen. Daß das Auge zu so hervorragenden Leistungen befähigt ist, kommt daher, daß diesen geschilderten Nachteilen eine Reihe großer Vorteile gegenüberstehen, die bei keinem künstlichen Apparat erreicht werden können. Vermöge seiner Beweg-

lichkeit in der Augenhöhle, die eine Drehung um einen etwa 13 mm hinter der Hornhaut gelegenen Punkt, den Augendrehpunkt, gestattet, wobei die Drehung sowohl um die horizontale Achse als auch um die vertikale mehr als 60° betragen kann, wird das Gebiet scharfer Wahrnehmungsfähigkeit vergrößert. Das Auge bestreicht mit großer Schnelligkeit die verschiedenen Teile des Gesichtsfeldes und bringt sie dadurch in das Gebiet hinreichend scharfer Abbildung, so daß das Auge hinsichtlich der Größe seines nutzbaren Gesichtsfeldes allen künstlich hergestellten optischen Systemen weit überlegen ist. Ferner kann durch willkürliche Veränderung der Krümmungsradien der Linse das Auge innerhalb eines bestimmten Bereiches verschiedenen Gegenstandsweiten angepaßt werden.

Naturgemäß können die angegebenen Zahlen nur als Mittelwerte aufgefaßt werden; die Werte der Krümmungsradien, ja selbst die Abstände sind von Auge zu Auge verschieden. Helmholtz gibt nach zahlreichen Messungen für das normale menschlishe Auge bei Einstellung

Bild 11.



auf ferne Gegenstände als Wert der vorderen Brennweite f = 15,50 mm, für die hintere f' = 20,71 mm. Streng genommen genügt aber die Angabe der Brennweiten noch nicht zur Darstellung des Strahlenganges im Auge. Es muß noch die Lage der Hauptpunkte (und der Knotenpunkte) bekannt sein. Da aber sowohl bei den Hauptpunkten als bei den Knotenpunkten der Abstand nur gering ist (etwa 0,4 mm), so kann man jedes Punktepaar für angenäherte Berechnung des Abbildungsvorganges zusammenfallen lassen und erhält damit für den Ort der beiden Hauptpunkte eine Entfernung von 2 mm von dem Scheitel der vorderen Hornhautfläche, für den Ort der beiden Knotenpunkte eine Entfernung von 7 mm vom gleichen Punkte.

Da der hintere Brennpunkt mit der Netzhaut zusammenfällt, der Ort der Hauptpunkte aber 2 mm vom Hornhautscheitel liegt, so gibt sich ein Gesamtdurchmesser des Auges von 22,71 mm und daraus der Knotenpunktsabstand von der Netzhaut mit 22,71 — 7,0 = 15,71 mm.

Die von den leuchtenden Punkten A und B (Bild 11) ausgehenden Strahlen erzeugen auf der Netzhaut die Bilder A' und B', zu deren Konstruktion es genügt, von allen in das Auge gelangenden Strahlen diejenigen herauszugreifen, welche durch den Knotenpunkt K ohne Winkel-

ablenkung verlaufen. Die Größe des umgekehrten verkleinerten Bildes A'B' verhält sich dann zu der Größe des Gegenstandes, wie die Entfernungen vom Knotenpunkt zueinander. Gegenüber der meist erheblichen Gegenstandsentfernung kann man den Knotenpunktsabstand vom Hornhautscheitel vernachlässigen und man erhält dann die Beziehung

$$\frac{\text{Bildgröße}}{\text{Gegenstandsgröße}} = \frac{16\text{ mm}}{\text{Gegenstandsentfernung}},$$

da der Knotenpunkt von der Netzhaut die Entfernung von etwa 16 mm hat. Demnach ist die Ausdehnung des Netzhautbildes um so viel kleiner gegenüber der Gegenstandsgröße, als 16 mm in der Gegenstandsentfernung enthalten sind, was für einen Abstand der gesehenen Dinge von 160 cm bereits 100 ausmacht.

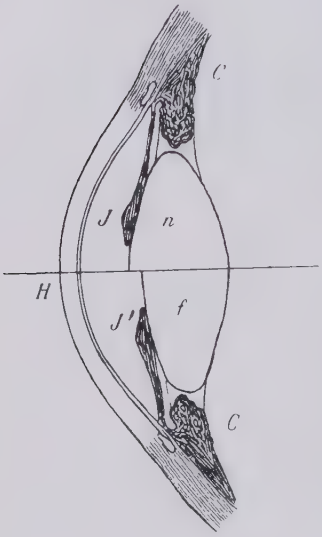
§ 6. Nahpunkt und Fernpunkt, Akkommodation.

Für ein starres optisches System, wie es durch ein photographisches Objektiv mit seinen unveränderlichen Linsen gegeben ist, sind jeder Gegenstandsentfernung bestimmte Bildentfernungen zugeordnet. Wäre die Augenlinse unveränderlich, so würden nur die Bilder unendlich ferner Gegenstände auf der Netzhaut scharf abgebildet werden. Für alle endlichen Entfernungen lägen die Bilder gemäß den auf S. 17 durchgeführten Betrachtungen erst hinter der Netzhaut; an Stelle der scharfen Bildpunkte entständen auf der Netzhaut Zerstreuungskreise, wodurch naturgemäß eine nur ungenaue Wahrnehmung bedingt wäre.

Das Auge ist nun aber nicht starr, sondern durch den an der Linse angreifenden Ziliarmuskel in ihrer Form veränderlich. Der Druck des Ziliarmuskels C bewirkt eine stärkere Krümmung der Flächen und zwar wächst die Krümmung der vorderen Fläche stärker als die der hinteren (Bild 12). Dieser als Akkommodation bezeichnete Vorgang ermöglicht es, auch für geringere Entfernungen der Gegenstände scharfe Bilder auf der Netzhaut zu erhalten, doch darf, da die Anpassungsfähigkeit der Augenlinse nicht ohne Grenzen ist, eine Mindestentfernung von etwa 14 cm für das normale Auge nicht unterschritten werden. Die größte Entfernung, auf die das normale Auge sich noch einstellen kann, wird durch den Fernpunkt, die geringste durch den Nahpunkt bezeichnet; der Abstand beider Punkte gibt ein Maß der Akkommodationsbreite. Zu beachten ist, daß bei dem Akkommodationsvorgang die hintere Linsenfläche ihren Ort kaum ändert, die vordere sich auf die Hornhaut zu bewegt. In Bild 12 ist die unverändert bleibende Hornhaut mit H, die Iris mit I und I', die auf Nähe akkommodierte Linse mit n, die auf die Ferne eingestellte Linse mit f bezeichnet.

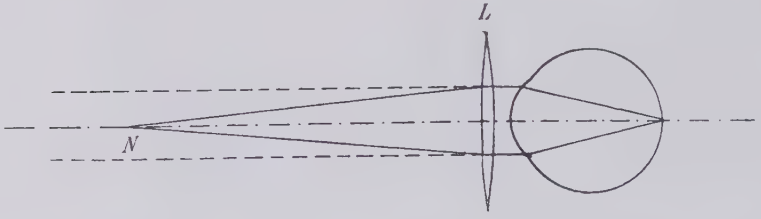
Das Auge hat also, je nach der eingestellten Gegenstandsentfernung, eine verschiedene Brechkraft, und man kann diese Brechkraft, ebenso wie ihre Veränderungen in einem besonderen Maß ausdrücken. Die Einheit der Brechkraft[1]) hat diejenige Linse, welche einen Meter Brennweite besitzt. In dieser Dioptrie genannten Einheit gemessen würden also Linsen von $\frac{1}{2}$ oder $\frac{1}{3}$ m Brennweite die Brechkraft 2 oder 3 Dioptrien haben. Da man nun für eine Anzahl unmittelbar hintereinandergesetzter dünner Linsen die brechenden Kräfte der Einzellinsen addieren kann, um die Brechkraft des gesamten Systems zu erhalten, so gibt der Dioptriebegriff ein einfaches Mittel um die Veränderung der Scheitelrefraktion des Auges darzustellen.

Bild 12.



Ebenso, wie man durch Akkommodation das Bild des Nahpunktes an den Ort der Netzhaut bringen kann, kann das auch geschehen dadurch, daß man vor das entspannte Auge eine Sammellinse bringt, deren Brennpunkt mit dem Nahepunkt N zusammenfällt (Bild 13). Diese Linse L bricht die vom Nahpunkt kommenden Strahlen so, daß sie parallel die Linse verlassen und demnach vom entspannten Auge auf der Netzhaut scharf zu einem Bild vereinigt werden. Die Änderung der Scheitelrefraktion ist also

Bild 13.



gleich dem Dioptriewert der vorgesetzten Linse oder, da ihre Brennweite gleich dem Nahpunktsabstand gesetzt werden kann, wenn der Linsenabstand vom Auge verschwindend klein ist, gleich dem reziproken Werte

[1]) Gewöhnlich wird an Stelle der „Brechkraft“ die Scheitelrefraktion benutzt, die aber für dünne Linsen den gleichen Wert hat, weil bei diesen die Hauptebenen mit den Scheiteln der Linse zusammenfallen.

des Nahpunktsabstandes selbst. Für das normale Auge, das bis auf 14 cm = 0,14 m akkommodieren kann, ist also die Akkommodationsbreite A

$$A = \frac{1}{0{,}14} = 7 \text{ Dioptrien.}$$

Für zwei beliebige Punkte M und N, deren Abstände vom Auge m und n sein mögen, ist also allgemein die erforderliche Akkommodationsleistung

$$A = \frac{1}{n} - \frac{1}{m},$$

woraus sich der oben angegebene Wert ergibt, wenn man m unendlich groß, n = 0,14 m setzt, M und N mit Fern- und Nahpunkt des normalen Auges zusammenfallen läßt.

Rechnet man die Abstände der einzelnen für die Abbildung im Auge wichtigen Punkte vom Hornhautscheitel aus, so ergibt sich nach Helmholtz für den Zustand der Fern- und Naheinstellung des Auges, wenn alle Größen in Millimeter gemessen werden:

	Einstellung auf Ferne	Nähe
Radius der Hornhaut	7,829	7,829
„ „ vorderen Linsenfläche . .	10	6
„ „ hinteren „ . .	6	5,5
Ort der vorderen Linsenfläche . . .	3,6	3,2
„ „ hinteren „ . . .	7,2	7,2
Vordere Brennweite des Auges . . .	15,5	14,0
Hintere „ „ „ . . .	20,71	18,69
Ort des vorderen Brennpunktes . . .	— 13,74	— 12,13
„ „ hinteren „ . . .	22,82	20,95
„ „ vorderen Hauptpunktes . . .	1,75	1,86
„ „ hinteren „ . . .	2,10	2,26
„ „ vorderen Knotenpunktes . .	6,97	6,57
„ „ hinteren „ . .	7,32	6,97

§ 7. Brechungsanomalien.

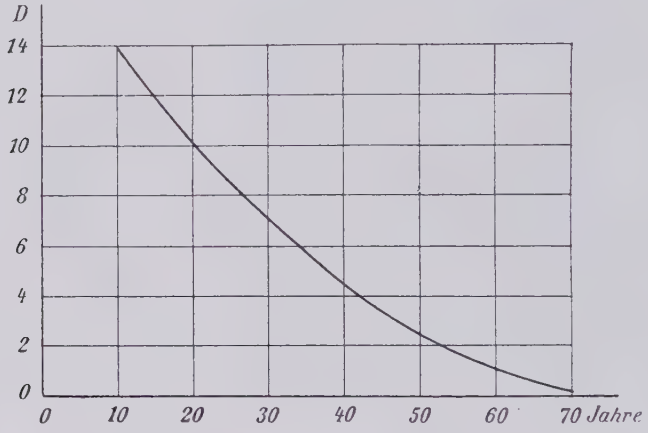
Von dem bisher angenommenen Fall, daß der Fernpunkt im Unendlichen, der Nahpunkt hingegen in etwa 14 cm Entfernung vom Auge liegt und alle zwischenliegenden Dinge scharf auf der Netzhaut abgebildet werden können, zeigen sich häufig Abweichungen sowohl in bezug auf die Lage des Nah- und Fernpunktes als auch in bezug auf die Größe des Akkommodationsgebietes (Ametropie.)

Zunächst zeigt sich, daß mit zunehmendem Alter die Akkommodationsbreite stetig abnimmt. Jugendliche Augen vermögen noch bis zu 7 cm

zu akkommodieren, während im Alter die Akkommodationsfähigkeit nahezu vollständig erlischt und nur in einer bestimmten Entfernung ein scharfes Bild erhalten wird. Bild 14 gibt die mittlere Abnahme der Akkommodationsbreite mit dem Alter wieder. Neben dieser als Presbyopie bezeichneten reinen Alterserscheinung, die streng genommen nicht als Anomalie zu betrachten ist, kommen in allen Lebensaltern als eigentliche Anomalien die Kurzsichtigkeit (Myopie) und die Weitsichtigkeit (Hyperopie) vor, als deren Ursache neben anderen häufig eine Verlängerung oder Verkürzung der Augenachse anzusehen ist.

Bei dem kurzsichtigen Auge werden im Unendlichen gelegene Dinge vor der Netzhaut abgebildet und können infolgedessen nicht mehr scharf gesehen werden. Mit Annäherung des Gegenstandes wandert das Bild

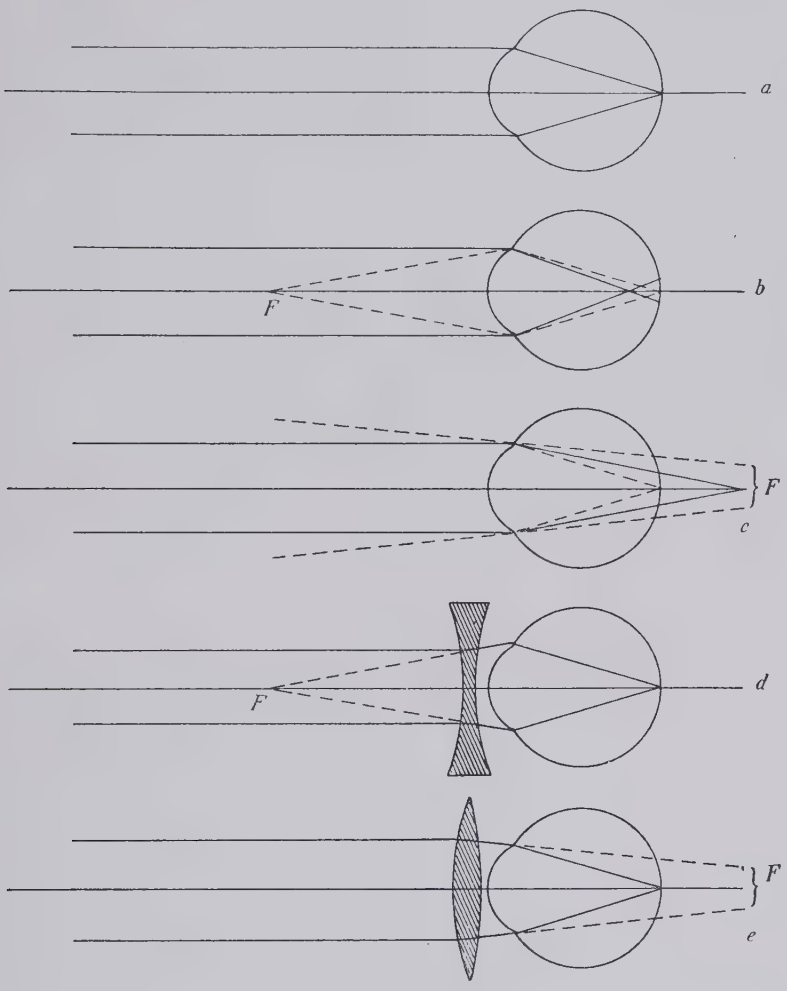
Bild 14.



auf die Netzhaut zu und erreicht diese bei der geringsten möglichen Krümmung der Linsenflächen für eine bestimmte endliche Entfernung. Der Fernpunkt liegt also nicht mehr im Unendlichen, sondern er ist je nach dem Grade der vorhandenen Myopie an das Auge herangerückt. (Bild 15 b). Ein entgegengesetztes Verhalten zeigt sich bei Weitsichtigkeit. Der Nahpunkt rückt vom Auge ab und der Fernpunkt, der über Unendlich hinauswandert, erscheint rückwärts vom Auge, das im Ruhezustande nur konvergent einfallende (nach einem Punkt hinzielende) Strahlen zur Vereinigung auf der Netzhaut bringen kann. (Bild 15 c.) Bei hochgradiger Hyperopie liegen sowohl Fernpunkt als Nahpunkt hinter dem Auge. Derartige Augen können also von der Außenwelt ohne Hilfsmittel überhaupt kein scharfes Bild erhalten, während der Kurzsichtige in jedem Falle wenigstens einen Teil des Dingraumes scharf abzubilden vermag. Durch geeignete Linsen, die so gewählt werden müssen, daß

ihr hinterer Brennpunkt mit dem Fernpunkt des ametropischen Auges zusammenfällt, läßt sich das Auge korrigieren, solange es seine Akkommodationsfähigkeit noch nicht eingebüßt hat (Bild 15 d und e)[1]).

Bild 15.



Ist das Akkommodationsgebiet A eines beliebigen Auges gegeben durch

$$A = N - F$$

wobei N die Nahpunkts- und F die Fernpunktsrefraktion ist, und ist für

[1]) In der medizinischen Optik ist es üblich, den Fernpunkt mit R (punctum remotum) und den Nahpunkt mit P (punctum proximum) zu bezeichnen. Die in Bild 15 benutzte Bezeichnung F bezieht sich in erster Linie auf die Lage des Brennpunktes der korrigierenden Linse.

ein ametropisches Auge die Fernpunktsrefraktion F durch die Brille zu Null geworden, so wird auch der Nahpunkt des Gesamtsystems gleichzeitig mit dem Fernpunkt so verlegt, daß sie mit den entsprechenden Punkten eines normalen Auges zusammenfallen.

Bei Ausfall der Akkommodation oder schon bei merklicher Verringerung derselben ist es nötig, für das Nahesehen eine besondere Brille zu benutzen (Lesebrille). Außer diesen verhältnismäßig leicht zu verbessernden Akkommodationsfehlern treten häufig andere Fehler des abbildenden Systems des Auges auf, deren Behebung schwer oder gar nicht möglich ist. Der für alle Betrachtungen angenommene Fall, daß die Achsen aller brechenden Rotationsflächen des Auges zusammenfallen, ist außerordentlich selten. Überdies zeigen sich auch Abweichungen von der Form einer Rotationsfläche, die bewirken, daß die in zwei zueinander senkrechten (durch die Augenachse gehenden) Ebenen verlaufenden Strahlen nicht an gleicher Stelle vereinigt werden, daß also keine punktweise Abbildung mehr möglich ist. Diese nicht punktweise (astigmatische) Strahlenbrechung wird trotz der Häufigkeit ihres Auftretens nur selten beachtet, weil bei geringen Graden des Astigmatismus die durch ihn erzeugte Bildunschärfe zu gering ist. Durch Wahl geeigneter Gläser, die durch eine Kombination von Zylinder- und Kugelflächen oder torische Flächen begrenzt sein müssen, sind die Fehler der Strahlenvereinigung auszugleichen, solange regelmäßiger Astigmatismus vorliegt. Bei unregelmäßigem Astigmatismus, der durch unregelmäßige Veränderung der Form der brechenden Flächen im Auge bedingt ist, läßt sich wohl eine Verminderung der Unschärfe erzielen, selten aber eine vollkommene Beseitigung.

Von dem Vorhandensein auch geringer Grade von Astigmatismus kann man sich leicht überzeugen, wenn man eine Tafel mit horizontalen und vertikalen gleichabständigen Strichen beobachtet. Bei einiger Aufmerksamkeit wird meist festgestellt werden können, daß nicht beide Strichsysteme gleichzeitig scharf gesehen werden können. Störend wirkt jedoch der Astigmatismus erst dann, wenn zur Scharfeinstellung der senkrecht zueinander liegenden Striche ein Unterschied der Akkommodationsleistung von mehr als einer Dioptrie erforderlich ist. Überdies wird angegeben, daß der Ziliarmuskel geringe Grade von Astigmatismus der Linse auszugleichen imstande ist.

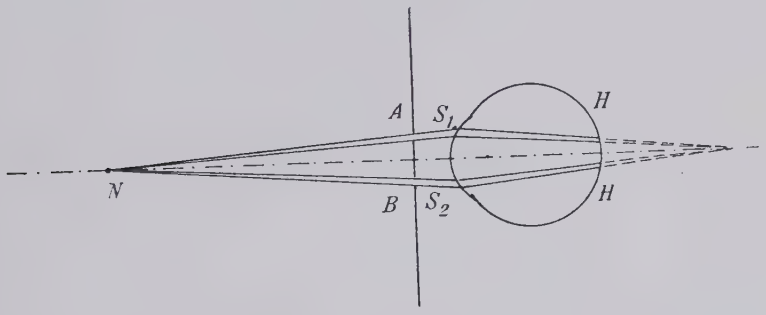
§ 8. Bestimmung der Brillengläser.

Zur Bestimmung der Lage von Fern- und Nahpunkten sind eine Reihe von Instrumenten angegeben worden, die als Optometer bezeichnet werden. Bereits die Scheinersche Versuchsanordnung kann als solches dienen. Blickt man durch die feinen Spalten A und B (Bild 16) in einem

Schirm (Kartenblatt) nach einer im Punkte N befindlichen Nadel, so wird man bei Bewegung der Nadel auf das Auge zu bald zu einer Stelle gelangen, für die eine Vereinigung der beiden abbildenden Bündel S_1 und S_2 auf der Netzhaut H—H nicht mehr möglich ist, und von der an die Nadel stets Doppelbilder ergibt. Durch Zwischenschalten von Linsen lassen sich die Verschiebungsgrenzen verkleinern. Auch andere Sehzeichen, wie Schriftproben, lassen sich zu diesem Zwecke verwenden (s. Abschn. IV, S. 62).

Ist auf diese Weise die Brennweite des zur Korrektion erforderlichen Brillenglases festgestellt, so läßt doch seine Form noch mancherlei Änderungen zu. Einfache bikonvexe und bikonkave Linsen[1]) von geringerer Brennweite weisen starke, störend wirkende Abbildungsfehler auf, besonders weil infolge der großen Beweglichkeit des Auges nicht nur der

Bild 16.



mittlere Teil eines Brillenglases in Frage kommt, sondern auch die schräg durch die Randteile des Brillenglases verlaufenden Strahlen noch eine gute punktweise Strahlenvereinigung zeigen müssen, weshalb die neueren Gläser nach dem Auge zu eine Hohlfläche aufweisen, also in Form von „durchgebogenen“ Linsen verwendet werden.

Im Lichte sind nun gewöhnlich eine ganze Reihe verschiedener Strahlungsarten (Farben) vertreten, die bei verschiedener Wellenlänge auch verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeit haben. Demnach müßte, streng genommen, jede Brille auch so berechnet werden, daß die Abweichungen in der Vereinigung der einzelnen Farben eine gewisse Grenze nicht überschreiten. Es zeigt sich aber, daß diese Farbenfehler beim Auge viel stärker sind, als bei den üblicherweise zur Verwendung gelangenden Gläsern. Für das reduzierte Auge folgt für Rot eine bildseitige Brennweite von 20,57 mm, für Blau 20,14 mm, so daß der Brennpunkt blauer Strahlen 0,43 mm vor der Netzhaut liegt, wenn rote, parallel einfallende Strahlen auf der Netzhaut vereinigt werden. Eine scharfe Ab-

[1]) Linsen mit gleicher Krümmung beider brechender Flächen.

bildung der blauen Bilder würde bei gleicher Akkommodation erreicht werden, wenn das Objekt auf 71 cm an das Auge herangebracht würde. Für eine bikonvexe Linse von 3 Dioptrien aus üblichem Kronglas aber würden das blaue und das rote Bild am gleichen Orte erzeugt werden, wenn der rote Gegenstand im Unendlichen, der blaue etwa 20 m von der Linse entfernt wäre. Der Farbenfehler im Auge ist also bedeutend größer als bei den Linsen. Wenn trotzdem Farbenerscheinungen im Auge nur in geringem Maße merklich sind, so ist das darauf zurückzuführen, daß die Netzhaut vorwiegend für grüne und gelbe Strahlen empfindlich ist, und die roten und blauen Strahlen selbst bei gleicher in ihnen enthaltenen Energiemenge nur einen viel schwächeren Reiz ausüben (s. S. 39).

Ein näheres Eingehen auf die verschiedenen Brillenformen muß wegen des beschränkten Raumes unterbleiben.

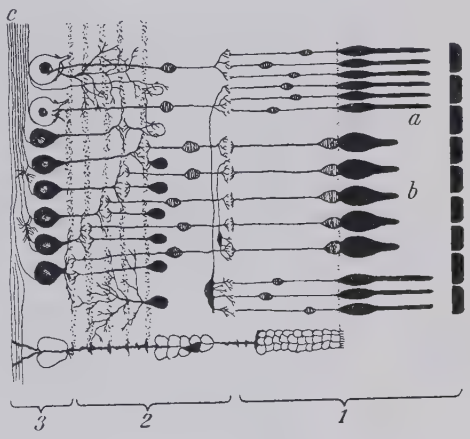
Abschnitt II.

Die Netzhaut.

§ 9. Die Ausbreitung des Sehnerven.

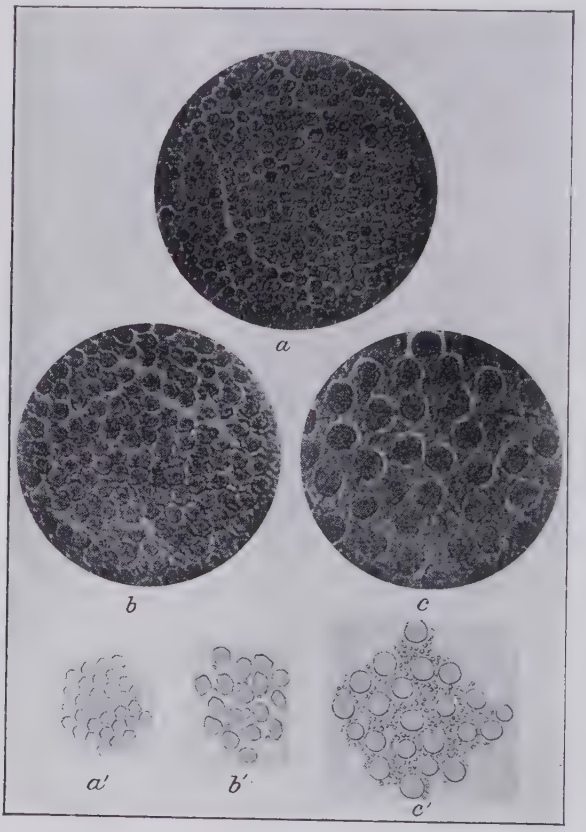
Die durch das optische System des Auges auf der Netzhaut entworfenen Bilder werden von dem Sehnerven aufgenommen, indem die Lichtenergie sich in Nervenreizungen umsetzt, die nach dem Gehirn die Kunde des neuen Auftretens und Verschwindens äußerer Dinge überbringen, gemäß dem Auftreten oder Verschwinden von Lichtempfindungen, die bestimmten Stellen des Raumes zugeordnet werden. Der Umwandlungsvorgang von objektivem Licht zu subjektiver Lichtempfindung findet in einem äußerst komplizierten Apparat statt. Jede Nervenfaser trägt ihre besonderen Aufnahmeorgane, die trotz der grossen Zahl (ungefähr 137 000 000) doch noch nicht als stetig die ganze Fläche des Augenhintergrundes ausfüllend betrachtet werden können. Dichter gedrängt an der Stelle des direkten Sehens gegenüber der Hornhaut an der Stelle F' (Bild 10), wo im Mittel etwa 13 000 Nervenendigungen mit den zugehörigen Aufnahmeelementen die Fläche eines Quadratmillimeters bedecken, wird der Abstand dieser immer größer, bis am Äquator des Auges die Zahl auf 4500 auf 1 qmm, gesunken ist. Ein Schnitt durch die Retina eines Säugetieres, der nach Ramón y Cajal schematisch wiedergegeben ist (Bild 17), zeigt bei a und b die zwei Formen der eigentlichen Aufnahmeelemente in der letzten, der Aderhaut zugewendeten Schicht (1) der Netzhaut (Retina), die als Stäbchen (a) und Zapfen (b) bezeichnet werden.

Bild 17.



Rechts davon sind die Pigmentkörper der Aderhaut angedeutet. Die Stäbchen sind zylindrisch, 0,063—0,081 mm lang und 0,002 mm dick; die Zapfen sind etwa 0,0045—0,0065 mm dick und kürzer als die Stäbchen. Durch eine Reihe von Schichten (2) gehen mannigfach verästelt die feinen Fasern von den Zapfen und Stäbchen zu der Nervenzellenschicht (3). Deren Nervenzellen und Ganglienkörper gehen mit ihren Ausläufern zum Teil in die radialen feinen Fasern, zum Teil in die

Bild 18.

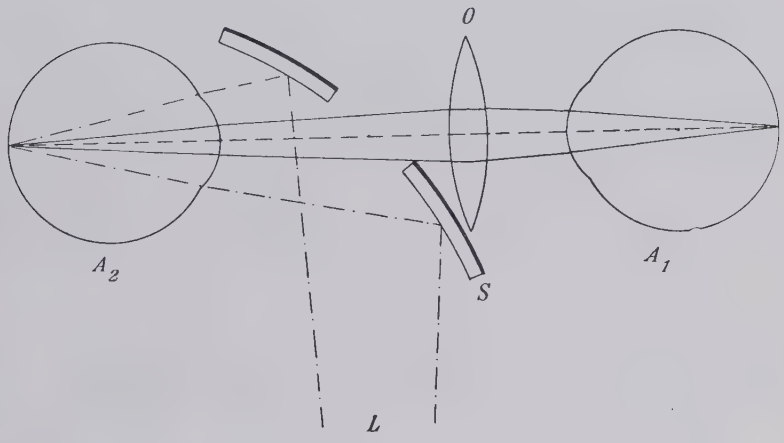


Sehnervenfasern (c) über, die sich von der Eintrittsstelle des Sehnerven (B in Bild 10) über die ganze Netzhaut verbreiten. Am dicksten ist diese Schicht naturgemäß in der Umgebung des Nervenstammes (0,2 mm), um nach den Grenzen der Netzhaut hin bis auf $^1/_{50}$ ihrer größten Dicke abzunehmen.

Stäbchen und Zapfen sind nicht gleichmäßig auf die verschiedenen Teile der Retina zerstreut. Gegenüber der Eintrittsstelle der Lichtstrahlen befinden sich nur Zapfen; diese Stelle des direkten Sehens, die durch einen

alle Teile durchdringenden Farbstoff (Pigment) gelb gefärbt ist und daher den Namen gelber Fleck erhalten hat, ist noch besonders dadurch ausgezeichnet, daß die Nervenfaserschicht (c) fehlt. Am Rande dieses in horizontaler Richtung etwa 2 mm, in vertikaler Richtung etwa 0,8 mm messenden gelben Fleckes ist die Nervenzellenschicht wallartig verdickt, während in der Mitte der Netzhautgrube (Fovea centralis) nur noch wenige Zellenschichten vorhanden sind, weshalb diese Stelle von etwa 0,13—0,3 mm Durchmesser zum schärfsten Sehen besonders geeignet ist, zumal die Zapfen hier am dichtesten gedrängt sind. Eine Aufnahme verschiedener Teile der Netzhaut eines Affen nach Heine (Bild 18) gibt ein deutliches Bild der Verteilung von Zapfen und Stäbchen. In etwa 450facher Vergrößerung gibt a die mikrophotographische Aufnahme selbst,

Bild 19.



a′ schematisch die sechseckige Form der Zapfen in der Mitte der Fovea, b und b′ die polygonalen Übergangsformen der Zapfen mit zwischengestreuten Stäbchen, c und c′ die großen runden Zapfen, wie sie in etwa $^1/_2$ mm Entfernung von dem gelben Fleck mit einem Kranze von Stäbchen auftreten.

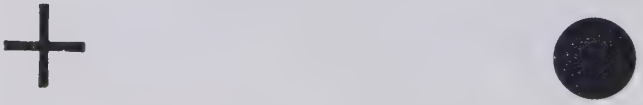
Es ist nach der Bauart der Netzhaut wahrscheinlich, daß die Vorgänge in den Zapfen wesentlich elektromagnetischer Natur sind und daß die zwischengeschalteten nervösen Gebilde die gleiche Bedeutung haben, wie die Drosselpulen in den Fernsprechleitungen, die eine Ausschaltung von Nebenwirkungen bezwecken. In den Stäbchen ist als erste Wirkung des Lichtes eine chemische Umwandlung des von Boll entdeckten intensiven Farbstoffes, des Sehpurpurs anzunehmen, dessen Ausbleichung auch außerhalb des Auges, vor allem unter der Wirkung kurzwelligen Lichtes, nachgewiesen ist.

Die feinere Anatomie der Netzhaut ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen gewesen, doch sind bezüglich der schon angegebenen Tatsachen wesentlich neue Ergebnisse nicht zu verzeichnen gewesen. Eine Beobachtung der Netzhaut am lebenden Auge, die freilich die Struktur kaum nachzuweisen gestattet, ist möglich mit Hilfe des von Helmholtz angegebenen Augenspiegels. Die von einer Lichtquelle (Bild 19) kommenden Lichtstrahlen, welche von einem in der Mitte durchbohrten oder wenigstens an dieser Stelle unversilberten Spiegel S in das Auge A_2 geleitet werden, werden an der Netzhaut zerstreut und treten durch die Pupille wieder aus, so daß sie von dem Auge A_1 des Beobachters aufgenommen werden können. Sind beide Augen normal und auf Unendlich akkommodiert, so wird ein, wenn auch kleiner Teil der Netzhaut, von A_2 scharf zur Abbildung auf die Netzhaut von A_1 gelangen. Besser ist es, durch passende Stellung und Wahl der Brechkraft einer Hilfslinse O die Abbildung zu vermitteln; selbst eine Photographie des Augenhintergrundes ist unter Vermeidung des Hornhautreflexes möglich geworden.

§ 10. Der blinde Fleck.

Ein einfacher Versuch zeigt, daß das Zustandekommen der Lichtempfindung an die Zapfen und Stäbchen gebunden ist. Diejenigen Stellen der Netzhaut, wo diese Elemente fehlen, sind „blind“. Schließt man das

Bild 20.



linke Auge und richtet den Blick scharf auf das in Bild 20 wiedergegebene Kreuz, so verschwindet der schwarze Kreis vollständig, wenn das Auge 20 cm von der Papierebene entfernt ist. Das Bild des Kreises fällt auf die Eintrittsstelle des Sehnerven, an der keine lichtempfindlichen Elemente, sondern nur die für die Ableitung des Nervenreizes nötigen Nervenfasern sich befinden. Form und scheinbare Größe dieses in jedem Auge nachweisbaren blinden Fleckes lassen sich unmittelbar bestimmen, indem man bei festgehaltener Blickrichtung die Orte auf einem Blatt Papier anzeichnet, in denen eine über das Papier geführte Federspitze verschwindet. Es ist ein ellipsoidischer Fleck von etwa 1,6—1,8 mm Durchmesser, dessen Mitte etwa 4 mm von der Mitte des gelben Fleckes entfernt ist. Auch an anderen Orten der Netzhaut treten Stellen auf, die infolge Fehlens von Stäbchen und Zapfen leer erscheinen, doch läßt sich für diese eine regelmäßige Lagerung nicht nachweisen.

§ 11. Weitere Ursachen der Reizung.

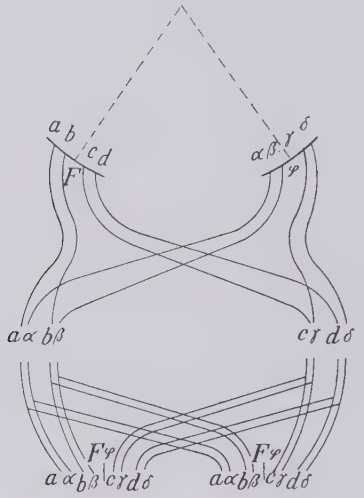
Wenn auch, wie aus dem Versuche ersichtlich, das Licht nicht unmittelbar auf die Nervenfasern wirkt, so ist damit doch nicht gesagt, daß jede als Lichtempfindung angezeigte Reizung der Nervenfasern durch Umsetzung von Lichtenergie in den Stäbchen und Zapfen hervorgerufen sein muß. Mechanische und elektrische Reizungen des Sehnerven verursachen gleichfalls Lichtempfindung, gleichgültig, ob die eigentlichen Empfangselemente dabei in Mitleidenschaft gezogen werden oder nicht. Schlag oder Stoß auf das Auge ergibt ein deutliches, blitzartiges Aufleuchten, ohne daß jedoch damit eine objektive Erleuchtung des Gesichtsfeldes verbunden ist. Es ist keinesfalls möglich, daß diese Lichtempfindung eine Erkennbarkeit äußerer Gegenstände verursacht. Bei einem örtlich beschränkten Druckreiz wird, vielleicht gemäß den vielfach gemachten Erfahrungen über den Ausgangsort von objektiven Lichtreizen, die Lichterscheinung stets an die Stelle des Gesichtsfeldes verlegt, welche dem Orte des Netzhautbildes entsprechen würde. Drückt man das Auge auf der Schläfenseite, so wird das Druckbild auf die Nasenseite verlegt. Je nach der Art des Druckes ist Form und Farbe des Druckbildes verschieden. Ähnliche Erscheinungen bieten sich bei einiger Aufmerksamkeit bereits bei lebhafter Bewegung des Auges oder bei starkem Blutandrang dar. Nach großen körperlichen Anstrengungen oder bei Krankheitsfällen treten oft lebhafte Licht- und Farbenerscheinungen auf, die bald als farbige, wallende Nebel, bald als begrenzte leuchtende Punkte sich darbieten. Selbst die geringe mechanische Druckwirkung bei schneller Akkommodation bewirkt ein Aufleuchten.

Eine starke Einwirkung zeigen auch die elektrischen Ströme. Dabei ist die erzeugte Lichterscheinung abhängig sowohl von der Stromstärke als auch von der Stromrichtung. Für die durch Röntgenstrahlen verursachte Lichtempfindung steht noch nicht fest, ob die Reizung der Nervenfasern unmittelbar erfolgt oder ob die durch die Röntgenstrahlen bewirkte Fluoreszenz wahrgenommen wird. Da nur für ein gut ausgeruhtes Auge die Wirkung der Röntgenstrahlen bemerkbar ist, so kann als sicher angenommen werden, daß nur die Stäbchen erregt werden, die allein einer starken Empfindlichkeitszunahme bei schwachen Reizen fähig sind. Bezüglich der Natur der Röntgenstrahlen sei erwähnt, daß sie elektromagnetische Schwingungen gleicher Art, wie das sichtbare Licht, sind. Ihre Wellenlänge jedoch ist etwa 1000mal kleiner als die des sichtbaren Lichtes, weist aber je nach der Erzeugungsart erhebliche Unterschiede auf.

§ 12. Die Nervenbahnen zum Gehirn.

In dem Sehnerven sind zunächst alle Nervenfasern zu einem Stamme vereinigt, der nach dem Gehirn hinführt. Für die Verschmelzung der von den beiden Augen getrennt aufgenommenen Bilder ist es wichtig, daß die Ganglienzellen des Hinterhauptlappens ebenso regelmäßig geordnet sind, wie die Netzhautendigungen mit Zapfen und Stäbchen in der Netzhaut. Bei der Erregung benachbarter Erregungselemente der Netzhaut werden auch entsprechend benachbarte Teilchen der Rinde des

Bild 21.



Hinterhauptlappens beeinflußt, von denen dann weitere „Assoziationsfasern“ zu anderen Teilen des Gehirns weiterlaufen. Abgesehen davon, daß ein Teil der Nervenfasern des rechten Auges nach der rechten Gehirnhälfte, ein anderer Teil zur linken Gehirnhälfte geht, und daß auf diese Weise bereits eine Verbindung der Nervenbahnen beider Augen hergestellt ist, da für das linke Auge entsprechendes gilt, ist im vorderen Vierhügelpaar nochmals eine Gabelung der Nervenfasern festzustellen, wodurch eine, für das räumliche Sehen wesentliche nervöse Doppelversorgung der Netzhaut oder wenigstens eines bestimmten Teiles derselben bedingt ist. Bild 21 zeigt andeutungsweise den Verlauf der Nervenbahnen von den Augen zum Gehirn, wobei die einzelnen Nervenfasern durch lateinische Buchstaben für das linke, durch griechische für das rechte Auge bezeichnet sind und die entsprechenden Netzhautstellen im gelben Fleck selbst oder in unmittelbarer Umgebung desselben liegend zu denken sind.

Abschnitt III.

Die Lichtempfindungen.

§ 13. Farben und Formen.

Die objektiv durch ihre Wellenlängen sich unterscheidenden Lichtarten werden im Auge als verschiedenfarbig empfunden. Die Farbe ist danach eine reine Empfindung und dieser Begriff ist wohl zu unterscheiden von dem der körperlichen Farben, die wegen ihrer Eigenschaft, nur bestimmte Wellenlängenbereiche in das Auge zurückzuwerfen, und daher farbig zu erscheinen, selbst diese Bezeichnung tragen. Wenn Goethe in der Einleitung zu seiner Farbenlehre die Farben als „Taten des Lichtes“ bezeichnet, so begeht er eine Verwechslung zwischen dem physiologischen und dem physikalischen Begriff der Farbe, zwischen Farbenempfindung und Körperfarben; ein ähnlicher Trugschluß ist es, den Goethe seiner ganzen Farbenlehre zugrunde legt, nämlich der, daß die einfache Empfindung des Weiß nicht durch eine Gesamtheit einzelner, unter sich verschiedener, aber gleichzeitig wirkender Erregungsursachen bewirkt werden können. Beim Ohre freilich ist es anders: hinreichende Übung ermöglicht es, aus einem Gemisch einzelner Töne, die den einzelnen Schwingungszahlen (Wellenlängen) entsprechenden Töne herauszuhören. Das Auge aber ist hierzu nicht imstande, und es läßt sich das Gesetz ganz allgemein so aussprechen, daß die Gesichtsempfindungen nie eine größere Mannigfaltigkeit aufweisen können als der Reiz, wohl aber eine geringere. Hierfür kann eine Reihe von Beweisen erbracht werden. Läßt man beispielsweise zwei verschiedene Farben im Wechsel auf dieselbe Netzhautstelle wirken, so wird der Eindruck dennoch einer einheitlichen Mischfarbe entsprechen, ebenso bringt eine mit verschiedenfarbigen Flecken bedeckte Fläche eines Bildes einen einheitlichen Eindruck hervor, wenn der Betrachtungsabstand groß genug gewählt wird. Das Zusammenwirken einer Reihe von Flecken gibt die Form, die die räumliche Anordnung kennzeichnet, welche aber auch ohne das Auge, durch das Tastgefühl allein erschlossen werden kann.

Beschränkt man sich zunächst auf die reinen Spektralfarben, also auf Strahlung von bestimmter Wellenlänge, so ist für die zur Empfindung führende Umwandlung der Energie in den Netzhautelementen eine bestimmte Energiemenge erforderlich; für starke Reize ist die Empfindung stärker als für schwache Reize und es ist zunächst die Aufgabe, diese Grenzen der Empfindung für verschiedene Lichtarten sowohl bezüglich des Auftretens eines Reizes überhaupt, als auch bezüglich der Erkennbarkeit des Unterschiedes verschieden starker Reize festzustellen.

§ 14. Fechnersches Gesetz.

Betrachtet man zunächst die Unterschiedsempfindlichkeit, so läßt sich als Grundgesetz, das auch für die anderen Sinnesempfindungen gilt, das folgende aufstellen: Die kleinsten wahrnehmbaren Unterschiede der Empfindung werden durch Reize ausgelöst, die einem bestimmten Bruchteil des Gesamtreizes entsprechen. Da weißes Licht sich in dieser Beziehung ebenso verhält, wie einfarbiges, so kann man sich die Bedeutung dieses Gesetzes auch bei ihm klar machen. Wird ein Zimmer durch zwei Kerzen erleuchtet, so wird das Anzünden einer weiteren Kerze noch eine deutlich erkennbare Helligkeitszunahme bewirken, während in einem durch zwei Bogenlampen erleuchteten Raume das Anzünden einer Kerze keine wahrnehmbare Helligkeitsänderung bedingt. Um eine dem ersten Fall entsprechende Helligkeitszunahme hervorzurufen, müßte eine dritte Bogenlampe in Betrieb gesetzt werden. Natürlich gilt dieses Gesetz nur innerhalb eines bestimmten Bereiches der Lichtstärke. Bei sehr großen Werten der Helligkeit verschwinden kleine in mittlerer Helligkeit wahrnehmbare Unterschiede ebensowohl, wie bei sehr geringen Werten. In einer fein abgetönten Zeichnung, die von hellem Sonnenlichte beschienen wird, verschwinden feinere Schatten. Das gleiche ist der Fall bei sehr schwacher Beleuchtung, beispielsweise im Mondlicht. Doch ist das übrigbleibende Gebiet mittlerer Helligkeiten, die der üblichen Beleuchtung entsprechen, noch groß genug, um das Gesetz in seiner einfachsten Form den meisten Betrachtungen zugrunde legen zu können und zwar ist nach zahlreichen Versuchen ein Unterschied noch zu erkennen, wenn die Helligkeit einer Fläche etwa $^1/_{100}$ größer oder kleiner ist, als die der Vergleichsfläche. Setzt man also die Grundhelligkeit H, den Helligkeitsunterschied, der einem eben noch deutlichen Empfindungsunterschied e entspricht, gleich h, so wird

$$e = A \cdot \frac{h}{H},$$

wobei A eine Konstante bedeutet. Bei sehr geringen Helligkeiten macht sich bereits der Einfluß des subjektiven „Eigenlichtes“ geltend und man

erhält, wenn man seine Wirkung der Reizung durch ein äußeres Licht von der Helligkeit H_0 gleich setzt:

$$e = A \cdot \frac{h}{H + H_0}.$$

Nach Volkmann ist die Stärke des Eigenlichtes etwa der Helligkeit einer schwarzen Samtfläche zu vergleichen, die durch eine Stearinkerze aus 3 m Entfernung beleuchtet wird. Aus diesem Gesetz würde folgen, daß die Gesamtempfindungsstärke unbegrenzt zunehmen müßte. Für sehr große Werte der Helligkeit wird aber die Empfindlichkeit wieder geringer, nachdem sie einen Höchstwert erreicht hat.

Dauber gibt für die Unterschiede der relativen Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke die folgende Zusammenstellung:

Beleuchtungsstärken in Lux	Größe der relativen Unterschiedsschwellen
12,5 — 25	0,00863
25 — 50	0,00609
50 — 75	0,00432
75 — 125	0,00323
125 — 250	0,00237
250 — 500	0,00256
500 — 1000	0,00366
1000 — 1500	0,00392
1500 — 11500	0,00474

Die Grenzen des Fechnerschen Gesetzes in seiner einfachen Form würden danach sehr enge sein (etwa 75—1000 Lux).

Wenn auch für die verschiedenen Wellenlängen des Lichtes die Form des Gesetzes dieselbe ist, so ist doch infolge der mit der Wellenlänge veränderlichen Größe von A eine Verschiedenheit der Wirkung kurzwelliger und langwelliger Lichter bei verschiedenen Helligkeitsstufen festzustellen (s. S. 39).

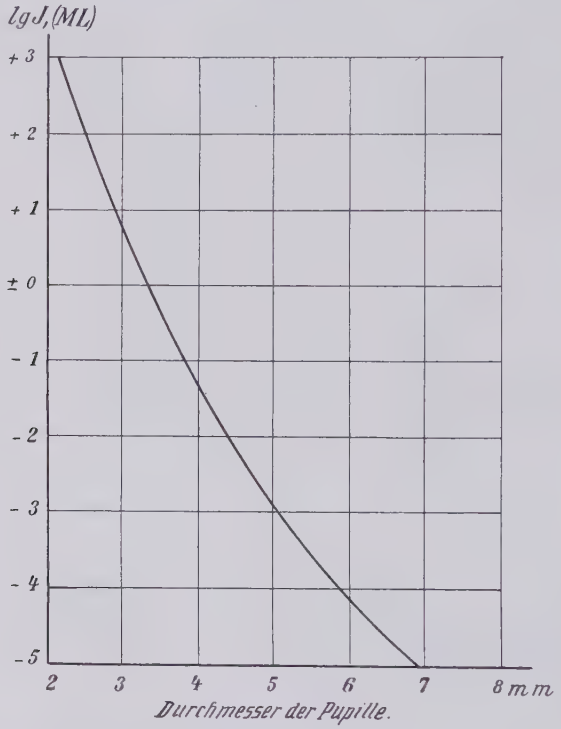
§ 15. Adaptation (Helligkeitsanpassung).

Wenn auch das Fechnersche Gesetz bereits die Erklärung dafür gibt, daß bei schwacher Beleuchtung die geringen Helligkeitsunterschiede nicht mehr wahrgenommen werden können und daß die bei Mondschein zu beobachtende stärkere Wirkung heller Gegenstände im Vergleich zu ihrer Umgebung auf die Abhängigkeit der Empfindungsstärke von der Helligkeit zurückzuführen ist, so ist damit doch das Verhalten des Auges bei verschiedenen Helligkeiten noch nicht erschöpfend beschrieben. Ähnlich wie das Auge vermöge seines Baues imstande ist, durch die

Arbeit des Ziliarmuskels sich der Entfernung des beobachteten Gegenstandes entsprechend einzustellen, so tritt bei Abnahme der äußeren Helligkeit eine Gegenwirkung im Auge auf, eine Anpassung oder Adaptation an die verringerte Lichtstärke.

Zunächst arbeitet die Pupille, welche bei Tageslicht einen Durchmesser von etwa 1,5—2 mm aufweist, in dem Sinne selbsttätig, daß sich ihr Durchmesser auf 8—9 mm (ausnahmsweise sind sogar 11 mm beobachtet) vergrößert. Unter sonst gleichen Bedingungen wird dadurch die Menge des in das Auge eintretenden Lichtes erhöht. Da die Lichtmenge

Bild 22.



durch die Flächengröße des Bündelquerschnittes bestimmt wird, wird daher die zur Reizung beitragende Lichtmenge $\frac{9 \cdot 9}{2 \cdot 2} = 20$ mal vergrößert werden. Die Änderungen der Flächenhelle sind dabei freilich viel erheblicher und können durch die im Vergleich geringfügige Vergrößerung des Querschnittes nicht aufgehoben werden. Nach Messungen von Nutting stehen die der größten und kleinsten Pupillenöffnung entsprechenden Werte der Helligkeiten im Verhältnis 1 : 100000000. Bild 22 gibt den Zusammenhang zwischen Pupillendurchmesser und Flächenhelligkeit,

welch letztere in „Millilambert“ (1 ML = 0,00035 HK/cm² [s. S. 43]) gemessen ist.

Die eigentliche Dunkeladaptation ist die Steigerung der Empfindlichkeit der Netzhautelemente. Dieser Vorgang der Anpassung ist für die beiden Arten der lichtempfindlichen Organe im Auge wesentlich verschieden. Während die Empfindlichkeit der Zapfen bei Dunkelheit nur etwa den 20fachen Wert des für Tageslichtsehen geltenden erreichen kann, wird sie für die Stäbchen ganz außerordentlich erhöht; jedoch nimmt sie nur langsam zu und erreicht erst nach mehrstündigem Aufenthalt im Dunkeln

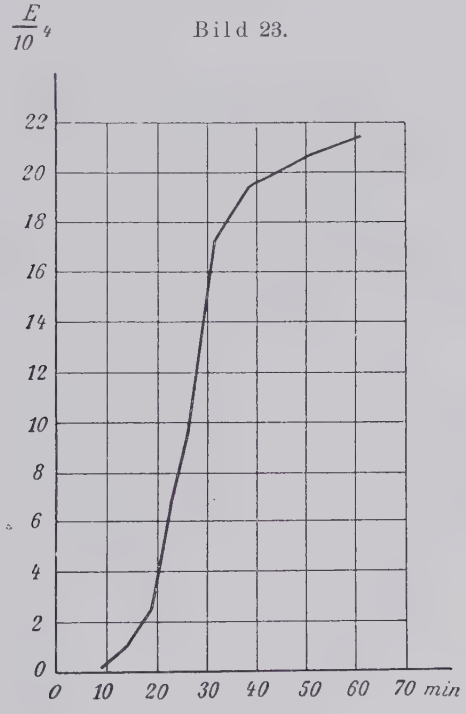
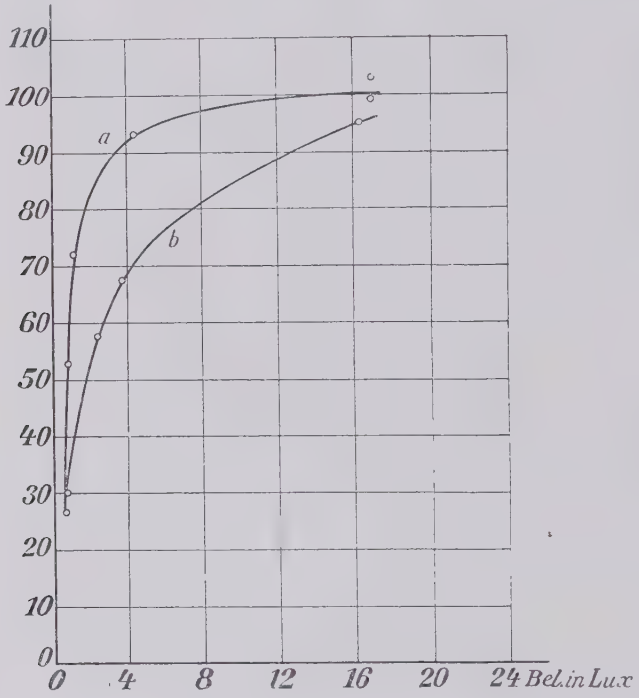


Bild 23.

ihren Höchstwert. Selbst vorübergehende Lichtreize stören den Vorgang der Adaptation bedeutend. Die in Bild 23 dargestellte Zunahme der Empfindlichkeit bezieht sich auf Gegenstandsgrößen, welche unter einem Sehwinkel von etwa 10 Grad erscheinen, deren Bild also weit größer ist, als der allein mit Zäpfchen besetzte Teil der Netzhaut, welcher nur etwa 1—2 Grad Durchmesser besitzt. Die Empfindlichkeiten E, die sich also auf die Stäbchen beziehen, sind auf eine Einheit bezogen, die gleich der Empfindlichkeit ist, bei der die Lichtstärke einer Meterkerze den Schwellenwert (S. 36) darstellt. Als Abzissen sind die Zeiten in Minuten aufgetragen.

Die Zunahme der Empfindlichkeit zeigt für alle Augen nahezu den gleichen Verlauf, nur sind ihre Endwerte als verschieden zu betrachten. Berücksichtigt man die Steigerung der zum Reiz beitragenden Lichtmenge durch die Pupillenvergrößerung, so gelangt man zum Ergebnis, daß noch bei äußeren Helligkeitsunterschieden, deren Verhältnis 1 : 4000000 beträgt, eine Orientierung durch das Auge möglich ist. Im gleichen Verhältnis etwa steht die Helligkeit des Mondlichtes zu der des Sonnenlichtes (1 : 5000000); ohne daß eine Blendung eintritt, kann also das

Bild 24.



helladaptierte Auge im hellen Tageslicht die Bilder der Außenwelt aufnehmen, es ist aber im Zustande der Dunkeladaptation empfindlich genug, um auch auf die geringen Lichtmengen der Mondbeleuchtung anzusprechen.

Für die beste Leistung des Auges ist weder das eine noch das andere Extrem geeignet. Dem Höchstwert der Leistungsfähigkeit entspricht eine bestimmte Beleuchtungsstärke. Um ein gedrucktes Blatt ohne Anstrengung lesen zu können, ist mindestens eine Beleuchtungsstärke von 10 Lux (S. 43) erforderlich, doch wird die Leistung bei stärkerer Beleuchtung größer, wie auch aus Bild 24 hervorgeht. Abgesehen von individuellen Unterschieden zeigt sich, daß die Zahl der

in einer Minute gelesenen Worte (als Ordinate aufgetragen) zunächst mit wachsender Beleuchtungsstärke schnell wächst um dann langsamer einem Höchstwert zuzustreben, und zwar entspricht die Kurve a einem normalen Auge, b einem durch häufige Arbeit bei künstlicher Beleuchtung überarbeiteten Auge. Die Wahl richtiger Beleuchtungsstärke ist also von äußerster Bedeutung, nicht nur im allgemeinen volkswirtschaftlichen Interesse, sondern auch bezüglich der Produktivität gewerblicher und industrieller Unternehmungen, bei denen unmittelbar eine Abhängigkeit der Leistung von der Beleuchtung festgestellt werden konnte.

Im Zustande der Dunkeladaptation genügt bereits eine äußerst geringe Energiemenge, um einen Reiz im Auge hervorzurufen. Wird diese in Erg[1]) gemessen, so erhält man bei günstigster Ausnützung der räumlichen und zeitlichen Verhältnisse etwa $2{,}6 \cdot 10^{-10}$ Erg.

§ 16. Örtliche Unterschiede der Empfindlichkeit der Netzhaut.

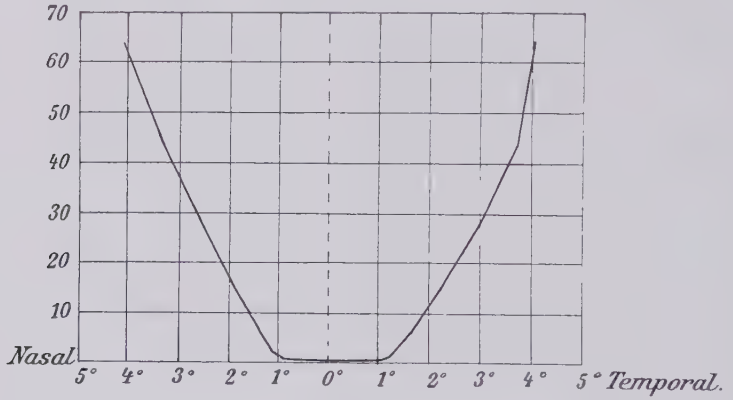
Im helladaptierten Auge liegt das Maximum der Empfindlichkeit in der Netzhautgrube. Nach Messungen von Vaughan und Boltunow, die feststellten, daß die Abnahme der Empfindlichkeit nach dem Rande der Netzhaut für rotes, grünes und blaues Licht völlig gleichartig ist, ist bei 10° Entfernung von der Mitte der Fovea die Empfindlichkeit nur noch $^1/_4$, bei 35° sogar nur noch $^1/_{40}$ der zentralen Empfindlichkeit. Für das dunkeladaptierte Auge sind die Empfindlichkeiten im gelben Fleck geringer als in den peripheren Teilen. Bei abnehmender Helligkeit nimmt anfangs die Empfindlichkeit aller Netzhautteile gleichmäßig zu, bleibt aber bald in der Netzhautgrube gegen die der äußeren, stäbchenreicheren Teile zurück. Nach Messungen von v. Kries ist für das dunkeladaptierte Auge innerhalb eines Bezirkes, der sich etwa 1° nach rechts und links vom Mittelpunkte der Fovea aus erstreckt, die Empfindlichkeit ziemlich klein, steigt dann aber nach außen sehr schnell an, um bereits bei 4° Abstand einen etwa 60fach größeren Wert zu erreichen. Bild 25 gibt diese Messungen wieder und zwar sind als Abzissen die Winkelabstände von der Netzhautgrubenmitte, als Ordinaten die relativen Empfindlichkeiten aufgetragen. Zwischen 10° und 20° erreicht die Empfindlichkeit ein Maximum. Zu bemerken ist noch, daß die angegebene Empfindlichkeitssteigerung nur für weißes Licht gilt. Für farbiges Licht verschiedener Art sind nur die qualitativen Gesetzmäßigkeiten die gleichen, die Zahlenwerte selbst aber wesentlich verschieden.

---

[1]) Ein Erg ist die Arbeit, die geleistet wird, wenn ein Milligramm (genauer $\frac{1}{981}$ g) ein Zentimeter hoch gehoben wird.

Die bisher geschilderten Gesetzmäßigkeiten sind aber auch in anderer Beziehung noch unzureichend. Sowohl die Kriesschen Messungen der örtlichen Empfindlichkeitsänderung, als auch die Eysterschen Werte der geringsten zur Reizung der Sehnerven hinreichenden Energiemengen lassen nicht erkennen, wie die Größe des gereizten Bezirkes auf die Wahrnehmbarkeit einwirkt. Aubert und nach ihm viele andere fanden, daß gesetzmäßige Beziehungen zwischen Lichtempfindlichkeit und Flächengröße des Bildes auf der Netzhaut bestehen. Bezeichnet man allgemein als Schwellenreiz einen solchen, der gerade noch ins Bewußtsein tritt und als Schwellenintensität die zu einem Schwellenreiz gehörige Lichtstärke, so läßt sich das für das rein foveale Sehen gültige Riccosche

Bild 25.



Licht-Empfindlichkeit des Auges.

Gesetz in der Form aussprechen, daß das Produkt aus Schwellenintensität und Netzhautbildgröße eine Konstante ist, oder wie man auch sagen kann, daß die Lichtempfindlichkeit mit der Flächengröße des Bildes wächst. Für die außerhalb der Netzhautgrube liegenden Teile der Retina gilt dieses Gesetz jedoch nicht mehr, vielmehr läßt sich innerhalb eines Bezirkes von etwa 10° Sehwinkel das Produkt aus Schwellenintensität und Quadratwurzel aus der Flächengröße (Sehwinkel) als Konstante betrachten. Daß dieses Gesetz nicht für die ganze Ausdehnung der Netzhaut gelten kann, ist schon deshalb zu erwarten, weil die Verteilung der Netzhautelemente nach der Peripherie des Auges hin sich ändert.

Eine neuere Arbeit von Gehlhoff und Schering gibt weitere Aufschlüsse über die Größe der Schwellenreize. Der kleinste bei früheren Versuchen zugrunde gelegte Sehwinkel war etwa 1 Bogenminute, entsprach also bereits dem mittleren Durchmesser der Zäpfchen. Bei Wahl von Sehwinkeln, unter denen die beobachteten Flächen erschienen, die den Bereich von etwa 17,5 Bogensekunden bis etwa 60 Bogenminuten umfaßten, zeigte

sich nun, daß eine Konstanz des Produktes aus Flächengröße und Schwellenreiz erst bei Sehwinkeln eintrat, die größer als 10′ waren. Für sehr kleine Werte der Sehwinkel war die Reizschwellenintensität sehr groß, erreichte dann bei 60″ einen innerhalb eines kleinen Intervalles konstanten Wert, um nach Überschreiten eines weiteren weniger stark ausgeprägten Haltepunktes bei etwa 3′ einem konstanten Grenzwert zuzustreben. Dies Verhalten wird verständlich, wenn man beachtet, daß für Sehwinkel bis zu 60″ etwa, bis zur Größe eines Zapfens oder einer mit einer Nervenfaser gekuppelten Stäbchengruppe, die auffallende Energie stets nur auf ein Empfangselement wirken wird, also das Gesetz der Nervenreizung für einen Zapfen oder 3 Stäbchen darstellt, während das Riccosche Gesetz für eine größere Zahl von Empfangselementen in Frage kommt, für die eine verhältnismäßig geringere Reizung schon ausreicht, um die Empfindungsschwelle zu überschreiten.

Bedeutung hat diese Frage für die Sichtbarkeit von Lichtquellen, die, als Signale bestimmt, auf größere Entfernungen bereits wahrgenommen werden sollen (Eisenbahnsignale).

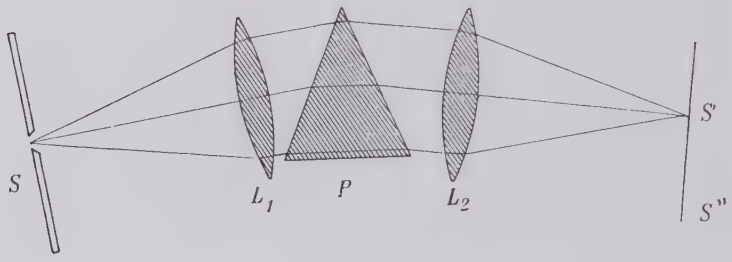
Ähnlich, wie beim Einzelauge durch die Vergrößerung der Fläche bis zu einem gewissen Grade bei gleicher Flächenhelligkeit eine Steigerung der Empfindlichkeit, also eine Vergrößerung des Reizes hervorgerufen werden kann, findet auch bei gleichzeitiger Einwirkung auf die dunkeladaptierten Augen eine Reizsummation statt. Piper zeigte, daß bei Beobachtung mit beiden Augen, während für Helladaptation die Empfindlichkeit für einäugiges und beidäugiges Sehen gleich war, nach etwa 14 Minuten dauernder Dunkeladaptation die Empfindlichkeit gegenüber monokularer Beobachtung erheblich zunimmt, und nach etwa 40 Minuten bereits den doppelten Wert erreicht. Die Versuchsergebnisse sind in der folgenden Tabelle dargestellt, wobei die Zeit vom Beginn des Adaptationsvorganges gemessen, die Empfindlichkeit in einem willkürlichen Maß angegeben ist.

Beidäugig		Rechtes Auge		Linkes Auge	
Zeit in Min.	Empfindlichkeit	Zeit in Min.	Empfindlichkeit	Zeit in Min.	Empfindlichkeit
0	86	1/2	111	1	111
3 1/2	272	4 1/2	498	5	498
8 1/2	2 720	9 1/2	2 910	10 1/2	3 420
14 1/2	11 800	15 1/2	13 500	16	14 500
20 1/2	41 600	21 1/2	27 800	22 1/2	23 000
27 1/2	65 700	28 1/2	38 400	30	33 100
37	81 600	39 1/2	40 000	40 1/2	37 000
52 1/2	97 700	56	40 000	57	41 600
59	97 700	—	—	—	—

§ 17. Hell- und Dunkelspektrum. Zapfen- und Stäbchensehen.

Läßt man ein schmales Bündel weißen Lichtes auf ein prismatisches Glasstück fallen, so wird das Bündel von seinem Wege abgelenkt und es wird auf einem weißen Schirme ein farbiges Band entstehen. Reiner erhält man diese Farben, wenn eine etwas andere Anordnung gewählt wird. Beleuchtet man einen engen Spalt S (Bild 26) mit weißem Licht, und macht die von dem Spalt ausgehenden Lichtstrahlen durch eine Linse L_1 parallel, so werden durch das Prisma P alle Strahlen gleicher Wellenlänge (Farbe) gleich abgelenkt, verlassen also das Prisma wieder unter sich parallel und können durch eine zweite Linse L_2 zu einem Spaltbilde S' vereinigt werden, das auf einem weißen Schirm aufgefangen werden kann. Da die Ablenkung der roten Strahlen geringer ist als die

Bild 26.



blauen, so werden die verschiedenfarbigen Spaltbilder an verschiedenen Orten entstehen, und in ihrer Gesamtheit das Spektrum S' - S'' der Lichtquelle darstellen.

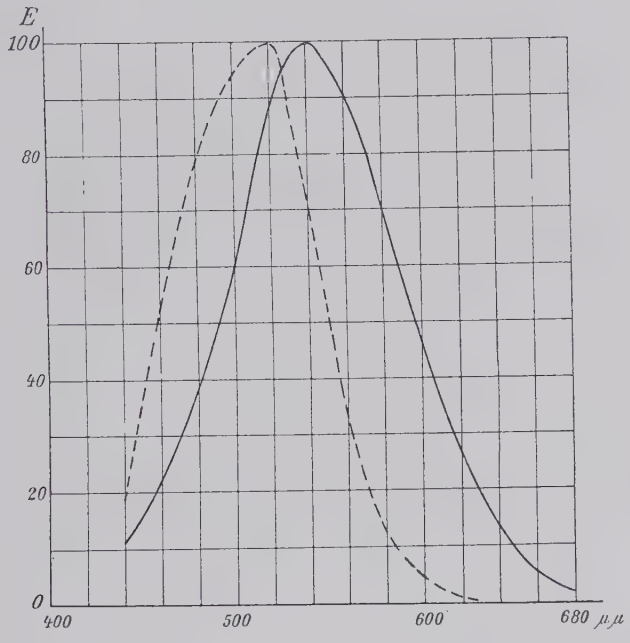
Für alle glühenden festen Körper ist dieses Spektrum ein ununterbrochenes Band, dessen Farben in stetigem Übergang von Rot über Orange, Gelb, Grün, Blau nach Violett hin gehen. Für glühende Gase, wie sie in einer mit Kochsalz oder anderen Metallsalzen gefärbten Gas- oder Spiritusflamme, oder in gasverdünnten Räumen beim Durchgange hochgespannter Ströme vorhanden sind, enthält das ausgesendete Licht nur wenige Wellenlängen, erzeugt also in dem in Bild 26 abgebildeten Apparat nur eine beschränkte Zahl von farbigen Spaltbildern; die zugehörige Wellenlänge kann also zur Bezeichnung einer bestimmten Farbe dienen. Im Spektrum des Sonnenlichtes treten an entsprechenden Stellen schwarze Linien auf, deren hervorstechendste von Frauenhofer mit großen lateinischen Buchstaben bezeichnet worden sind, und die, in Tausendstel Millimetern, für die als neue Einheit die Bezeichnung μ gewählt worden ist, gemessen, die Wellenlängen haben:

Linie	A	B	C	D	E	F	G	H
Wellenlänge	0,760	0,687	0,656	0,589	0,527	0,486	0,431	0,397
Farbe	rot		orange	gelb	grün	blaugrün	indigo	violett

Die Wellenlängen der Linien C, F, G werden durch glühenden Wasserstoff, die von D durch Natriumdämpfe erzeugt.

Es ist nun gezeigt worden, daß, bestimmtes Licht vorausgesetzt, die Helligkeitsempfindung mit der Menge der zugeführten Lichtenergie steigt. Für die verschiedenen Wellenlängen aber erzeugt eine gleich große Energiemenge keineswegs die gleiche Helligkeitsempfindung, wie schon daraus

Bild 27.



entnommen werden kann, daß nachweisbar auch jenseits der Linien A und H im Spektrum einer weißen Lichtquelle noch Energie vorhanden ist, also noch „dunkle“, vom Auge überhaupt nicht wahrgenommene Strahlen ausgesandt werden, von denen die langwelligen (ultraroten), jenseits A gelegenen durch ihre Wärmewirkung, die kurzwelligen (ultravioletten), jenseits H gelegenen sich durch ihre Einwirkung auf die photographische Platte verraten. Demnach muß die Empfindlichkeit für die verschiedenen Farben im Auge verschieden sein. Da nun einerseits die jeder Wellenlänge entsprechende Energiemenge in der Strahlung eines glühenden festen Körpers bestimmbar ist, für blankes Platin und den „schwarzen Körper“ sogar rechnerisch ermittelt werden kann, anderer-

seits die Reizwirkung im Auge auch gemessen werden kann, so läßt sich die Empfindlichkeit des Auges für die verschiedenen Strahlenarten in Abhängigkeit von der Wellenlänge darstellen, und man hat gefunden, daß die Empfindlichkeiten sowohl ihrer Größe, wie ihrer Verteilung nach für Zapfen und Stäbchen verschieden sind. Bild 27 zeigt in der ausgezogenen Linie die Verteilung der Empfindlichkeiten für die Zapfen, in der gestrichelten Linie die Empfindlichkeit für die Stäbchen nach den Angaben von H. Bender. Die Wellenlängen sind in Milliontel Millimeter ($\mu\mu$) angegeben. Während also die höchste Empfindlichkeit für die Zapfen für eine Wellenlänge von etwa 550 $\mu\mu$, die der Empfindung des Gelbgrün entspricht, auftritt, liegt die größte Empfindlichkeit der Stäbchen bei etwa 520 $\mu\mu$ im blaugrünen Teile des Spektrums.

Die Empfindlichkeitskurve der Zapfen ergibt sich, wenn die Helligkeit sehr groß ist. Verringert man die Helligkeit aller Farben gleichmäßig, etwa dadurch, daß man die Öffnung der Linse L_1 (Bild 26) verkleinert, so wird bei einer bestimmten Helligkeit des Spektrums die Aufnahmefähigkeit der Zapfen aufhören, und es kann das nunmehr vorhandene Dunkelspektrum nur noch eine Reizung der Stäbchen hervorbringen, also nur noch von außerhalb der Netzhautgrube gelegenen Teilen der Netzhaut wahrgenommen werden.

Bei diesem Übergang verliert sich auch die Farbenerscheinung: anstelle des in glänzenden Farben erscheinenden Bandes tritt nun ein und in seinen Teilen verschieden helles graues Band. Die Stäbchen sind total farbenblind und geben bei Strahlungen aller Wellenlängen nur eine farblose Helligkeit.

Die Empfindung des „Weiß“ kann daher auf zwei Weisen entstehen; entweder es werden die Zapfen durch ein passendes Gemisch verschiedener Wellenlängen, wie solches beispielsweise in den weißen Lichtquellen gegeben ist, gereizt, oder es werden die Stäbchen bei beliebiger Art der Erregung einen farblosen Helligkeitseindruck vermitteln, den Lummer als „Stäbchenweiß“ bezeichnet, und der sich bei der Beobachtung als wesentlich verschieden von dem Weißeindruck der Zapfen erweist. Auf diese v. Kriessche Theorie (1894) der verschiedenen Wirkungsweise der Zapfen und Stäbchen sich stützend, hat Lummer auch eine Erklärung der Weberschen Beobachtungen gegeben. Letzterer gab an, daß bei langsamer Erhitzung eines Körpers vor Auftreten der Rotglut bereits ein „gespenstergraues“ Licht wahrzunehmen sei, das erst über die Zwischenstufen Aschgrau und Gelblichgrau zu Feuerrot übergeht. Die Erklärung für diese Erscheinung ist bereits in der Verschiedenheit der Wirkung von Zapfen und Stäbchen gegeben: ehe die Zapfen einen farbigen Eindruck aufnehmen können, wirkt das schwache Licht schon auf die Stäbchen, die nur ein „graues“ Leuchten anzeigen können.

Erinnert man sich nun der Verteilung der beiden Arten von Empfangselementen auf der Netzhaut, so ergibt sich, daß man das Hellspektrum beim direkten Sehen beobachten wird, d. h. wenn man durch geeignete Einstellung (Fixieren) des Auges das Bild auf die Netzhautgrube bringt, daß hingegen das Dunkelspektrum nur sichtbar wird bei indirektem Sehen, wenn man also gewissermaßen an dem zu beobachtenden Farbenband vorbeisieht. Zu dieser ungewohnten Art der Beobachtung ist eine besondere Übung erforderlich, weshalb die Erscheinung des Dunkelspektrums nur selten wahrgenommen wird. Dennoch ist die Tatsache, daß bei Dunkelheit die Farbenempfindung aufhört und einer reinen Helligkeitsempfindung weicht, leicht zu beobachten: Bei Mondlicht ist selbst die Färbung leuchtend roter Ziegeldächer nicht mehr festzustellen. Der allmähliche Übergang vom Hell- zum Dunkelsehen läßt sich sehr gut beobachten, wenn man während der Dämmerung in einer Gemäldegalerie auf das Verblassen der Farbtöne achtet.

Das Bestreben, möglichst direkt zu sehen, kann nun im Dunkeln eigenartige Täuschungen hervorrufen. Ist ein Gegenstand (etwa ein schwacher Lichtfleck im dunklen Zimmer) so schwach beleuchtet, daß er nur noch von den Stäbchen, nicht aber von den Zapfen wahrgenommen werden kann, so wird, wenn das Auge suchend umherstreicht, ein Reiz in den peripher vorhandenen Stäbchen das Vorhandensein des Gegenstandes anzeigen. Versucht man nun, das Auge auf die Stelle zu richten, wo der Ursprung des Reizes nach dem Orte des Stäbchenbildes zu suchen wäre, so wird trotz aller Mühe der Gegenstand für das Auge verschwinden, weil die Zapfen nicht empfindlich genug sind, um auf das schwache Licht anzusprechen. Bei weiterer Bewegung des Auges taucht, grauschimmernd, der Gegenstand wieder auf: Solange eine Erklärung dieser Erscheinung nicht gegeben wurde, konnte der Aberglaube auf diese Weise seine Gespenstererscheinungen beweisen! Das gleiche Spiel zeigt sich auch bei Irrlichtern, jenen schwach leuchtenden Flämmchen von Phosphorwasserstoff, die, hin- und herhuschend, bald auftauchen, bald verschwunden sind, bei denen also die Beweglichkeit der Flamme mit den subjektiven Veränderungen der Sichtbarkeit wetteifert, um die Täuschung hervorzubringen.

Lummer beschreibt die Eindrücke während einer gemeinsam mit Pringsheim unternommenen nächtlichen Ballonfahrt; der Übergang vom Zapfen- zum Stäbchensehen ließ sich äußerst klar erkennen. Auch das Auftauchen der „Gespenstererscheinungen“ konnte festgestellt werden.

Danach kann man die Wirkung der Zapfen und Stäbchen vergleichen mit der Wirkung, die sich bei einer für farbige Aufnahmen geeigneten photographischen Rasterplatte (Lumièreplatte) im Gegensatz zu einer gewöhnlichen photographischen Platte ergibt. Bei ersterer wird das Bild infolge der eingelagerten Farbteilchen in einer Anzahl farbiger Flecke

entworfen, die in ihrer Gesamtheit die natürlichen Farben wiedergeben, bei der normalen Platte entsteht anstelle des farbigen Bildes eine Abstufung von Hell und Dunkel. Auch bezüglich der Empfindlichkeit schließt sich der Vergleich den Tatsachen an: Die Rasterplatte erfordert eine viel stärkere Belichtung, ist also bei geringer Helligkeit für Aufnahmen nicht geeignet, während die gewöhnliche Platte auch bei sehr geringer Helligkeit eine Aufnahme gestattet.

Wie Schulze schon 1866 angab, lange bevor die Physiologen die verschiedene Wirkung der Zapfen und Stäbchen erkannten, ist in den Augen der Nachttiere, Eule, Igel, Maulwurf, Fledermaus, nur eine Art lichtempfindlicher Netzhautelemente zu finden; diese Tiere können demgemäß als reine Stäbchenseher nur reine Helligkeitsempfindungen haben.

§ 18. Purkinjesches Phänomen.

Es ist bereits angegeben, daß bei Betrachtung eines Gemäldes die Helligkeitswerte der Farben sich mit abnehmender Beleuchtung verändern. Für ein rotes und ein blaues Feld, die bei mittlerer Beleuchtung nahezu gleich hell erscheinen, zeigt sich bei Abnahme der Beleuchtungsstärke, daß das rote Feld merklich schnellere Helligkeitsabnahme aufweist, wie das blaue. Wählt man als Wellenlängen etwa 610 und 470 $\mu\mu$, so wird, da die Empfindlichkeit nach Bild 27 für beide Farben in der Zapfenkurve die gleiche ist, gleiche objektive Helligkeit auch gleich starke Reize hervorbringen. Läßt man die Helligkeit beider Farben gleichmäßig abnehmen, so ergibt sich, sobald die Zapfen ausschalten und reines Stäbchensehen eintritt, für Rot eine verminderte, für Blau eine erhöhte Empfindlichkeit und damit für Rot ein etwa 10—15 mal kleinerer Reiz, für Blau ein etwa $2\,^1/_2$ mal größerer, so daß insgesamt die vorher gleiche Helligkeitsempfindung für beide Felder nunmehr um mehr als das 25fache sich unterscheidet. Sind jedoch die Felder so klein, daß ihr Bild nur auf die Netzhautgrube fällt, so darf eine Veränderung des Helligkeitswertes beider Felder nicht auftreten, was auch durch den Versuch bestätigt ist.

§ 19. Photometrische Grundgesetze.

Wie schon betont, ist eine unmittelbare Bestimmung der Helligkeit einer Lichtquelle nicht möglich, weil einerseits das Auge nur zur Beurteilung von gleich und ungleich geeignet ist, andererseits, weil eine Messung der von einer Lichtquelle ausgehenden Energiestrahlung nicht die Werte der Helligkeit ergeben kann, da das Auge einen Teil der Strahlung (ultrarote und ultraviolette Strahlung) überhaupt nicht, die

sichtbare Strahlung aber je nach ihrer Wellenlänge mit verschiedener Empfindlichkeit wahrnimmt. Demgemäß bleiben zwei Wege zur Bestimmung der Helligkeit einer Lichtquelle: entweder man schwächt beim Vergleich zweier Lichtquellen, deren eine einer noch festzusetzenden Einheit entspricht, die Strahlung der stärkeren Lichtquelle meßbar so lange, bis beide gleich hell erscheinen, was als subjektive Photometrie (Lichtmessung) bezeichnet werden mag, oder man bestimmt den Teil der von einer Lichtquelle ausgehenden Strahlung, der als „Licht" empfunden wird mit Hilfe physikalischer, vom Auge unabhängiger Apparate (objektive Photometrie).

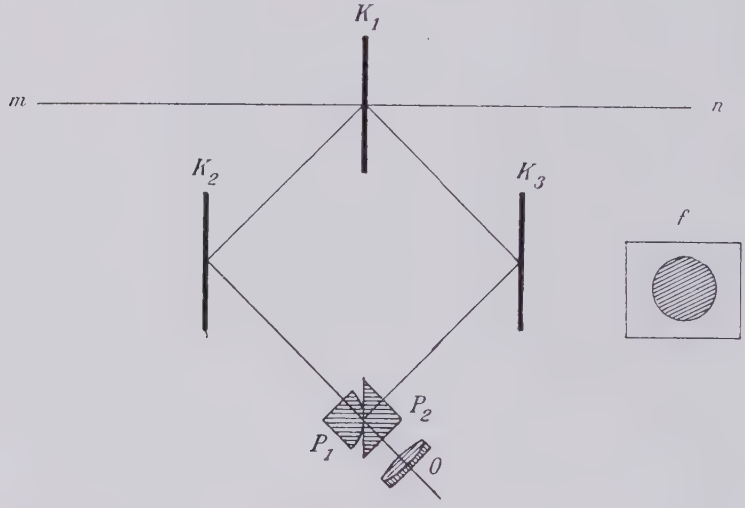
Bei der subjektiven Photometrie, dem älteren Verfahren, wird nun nicht die Helligkeit der Lichtquellen selbst verglichen, sondern man vergleicht die Beleuchtungsstärken, die von den Lichtquellen auf zwei Flächen gleicher Art hervorgebracht werden. Nimmt man die Lichtquellen als sehr klein (punktförmig) an, so daß die Strahlung der Lichtquelle nach allen Seiten gleichmäßig ist, so wird durch eine, die Lichtquelle vollständig umhüllende Kugelfläche in jeder Zeiteinheit die gleiche Lichtmenge hindurchgehen. Bezeichnet man nun als „Lichtstrom" Ψ die Energiemenge, die in der Zeiteinheit die Kugelfläche durchsetzt, so ist dieser Lichtstrom ein Maß für die „Leistung" der Lichtquelle. Die Einheit des Lichtstroms wird „Lumen" genannt. Je größer der Radius der die Lichtquelle umschließenden Kugelfläche ist, desto geringer ist der Lichtstrom, der durch ein Flächenstück bestimmter Größe hindurchgeht, oder, wenn man die Kugel als undurchsichtig annimmt, der die Beleuchtung des Flächenstückes bewirkt. Die Oberfläche einer Kugel vom Radius r hat die Fläche $F = 4\,\pi\,r^2$ und damit ist die „Beleuchtungsstärke" E gegeben durch

$$E = \frac{\text{Lichtstrom}}{\text{beleuchtete Fläche}} = \frac{\Psi}{F} = \frac{\Psi}{4\,\pi\,r^2}$$

Die Beleuchtungsstärke, deren Einheit „Lux" genannt wird, nimmt also mit dem Quadrat der Entfernung ab. Dadurch ist also ein Mittel gegeben, um die Beleuchtungsstärke einer Fläche nach Belieben zu verändern. Sendet die Lichtquelle den Lichtstrom $4\,\pi$ Lumen aus, und wird eine Fläche in 1 m Entfernung beleuchtet, so hat diese die Beleuchtungsstärke 1 Lux, wird die Entfernung auf 2 m vergrößert, so ist die Beleuchtungsstärke nunmehr gleich $^1/_4$ Lux usw. Eine nach allen Seiten gleichmäßig strahlende Lichtquelle, die den Lichtstrom $4\,\pi$ aussendet, ist als Einheit der Lichtstärke zu wählen. Als solche dient die „Hefnerkerze" (HK), eine mit reinem Amylazetat brennende Lampe von 40 mm Flammenhöhe bei 8 mm Dochtdurchmesser. Beleuchtet man also einen Schirm K_1 (Bild 28) aus einem weißen alle Wellenlängen vollkommen

zurückwerfenden Stoffe [1]), z. B. eine beiderseits mit Magnesiumoxyd bedeckte Gipsplatte einerseits durch die Lichtquelle m, andererseits durch die Lichtquelle n, so kann durch entsprechende Wahl der Entfernungen beider Lichtquellen die Beleuchtungsstärke beiderseits gleich gemacht werden. Das zerstreut zurückgeworfene Licht gelangt zu den Gipsschirmen K_2 und K_3, die durch das Prismensystem $P_1 - P_2$ und die Lupe O Licht in das beobachtende Auge senden. An den Stellen, wo die ebene Hypotenusenfläche von P_2 und die schwach gewölbte Fläche von P_1 sich berühren, geht das von K_2 kommende Licht ohne Verlust hindurch, während an den gegen Luft grenzenden Hypotenusenteilen von P_2 das

Bild 28.



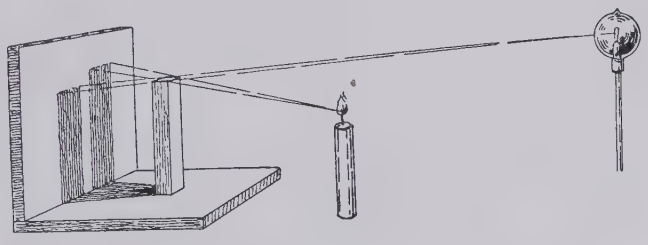
Licht von K_3 vollständig gespiegelt wird. Der äußere, in f nicht schraffierte Teil des Gesichtsfeldes wird also nur von der Lichtquelle n beleuchtet, der mittlere schraffierte Teil nur von m. Die mit Hilfe der Lupe scharf eingestellte Begrenzungslinie beider Felder verschwindet bei Gleichheit der Helligkeiten, die, wie angegeben durch Veränderung der Entfernungen der Lichtquellen vom Schirm K_1 eingestellt werden können. Nach dem Ausbreitungsgesetz der Lichtenergie ergibt sich dann für das Verhältnis der Lichtstärken L_1 und L_1

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

[1]) Vollständig weiße Körper sind nicht bekannt. Ein kleiner Teil der Lichtenergie dringt stets in den Körper ein, und wird in ihm verschluckt (in Wärme verwandelt). Für praktische Verwendung als „weiß" zu bezeichnende Körper sind Gips, Magnesiumoxyd, bei geringeren Ansprüchen selbst Papier.

worin r_1 und r_2 die Entfernungen der Lichtquellen von K_1 bezeichnen. Diese Methode der Lichtstärkenvergleichung, welche experimentell manchen Abänderungen unterworfen werden kann, — es sei nur noch das Schattenphotometer von Rumford erwähnt, bei dem die von zwei Lichtquellen entstehenden Schatten eines Körpers auf einer weißen Fläche verglichen werden (Bild 29) —, ist ohne Schwierigkeiten durchführbar, solange die Färbung beider Lichtquellen gleich ist, d. h. von den verschiedenen Strahlenarten im Gemisch gleiche Anteile enthalten sind. Für die verschiedenen weißen Lichtquellen ist dieses wenigstens näherungsweise der Fall. Bei sehr stark in ihrer Helligkeit verschiedenen Lichtquellen, wobei an die in Lichtstärken zwischen 2 und 1000 Hefnerkerzen angefertigten Glühlampen erinnert sein möge, ist meist Vergleich mit einer Lampe mittlerer Helligkeit am Platze, weil dabei die bei den hellsten und dunkelsten Lampen vorhandene Farbendifferenz weniger störend auftritt, und weil auch die Entfernungsunterschiede und damit die Fehler kleiner werden.

Bild 29.



Ebensogut, wie weiße Felder lassen sich auch solche von gleichem Farbenton vergleichen, wovon in einer Reihe physikalischer Apparate entsprechender Gebrauch gemacht wird. Die zur Temperaturmessung viel benutzten Pyrometer beruhen auf dem Vergleich der Helligkeit einer Normallampe zu der Helligkeit im Ofen, dessen Temperatur gemessen werden soll. Je nach der zu messenden Temperatur ist die Farbe der Vergleichsfelder rot, gelb oder weiß. Soll die in der Volumeinheit enthaltene Menge einer gelösten farbigen Substanz ermittelt werden, so wird deren Schichtdicke so lange verändert, bis der Lichtverlust ebenso groß wird, wie in einer bekannten Normallösung, was durch gleiche Helligkeit zweier farbiger Felder erkannt wird. Ähnlich ist auch die Verwendung des photometrischen Einstellungsverfahrens bei Polarisationsapparaten und bei spektrophotometrischen Messungen. Das in den meisten Fällen kreisförmige Gesichtsfeld ist durch horizontale oder vertikale Geraden in zwei oder drei Teile geteilt.

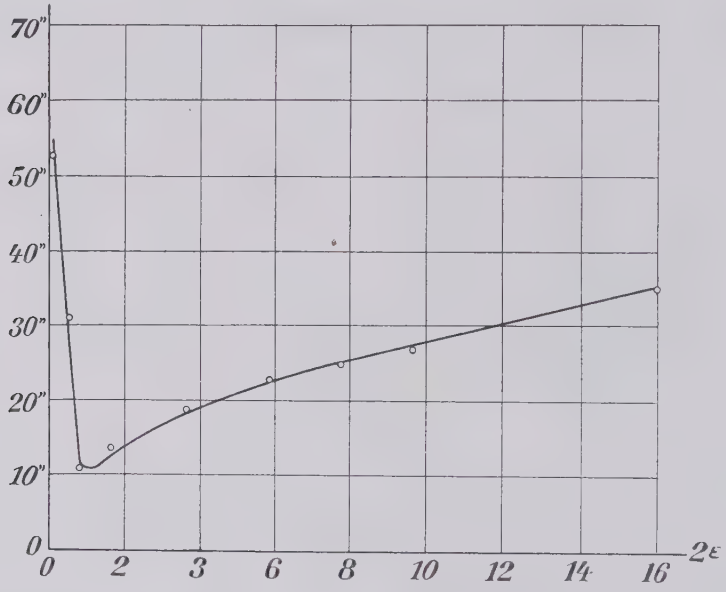
§ 20. Photometrische Empfindlichkeit.

Nach dem Fechnerschen Gesetz würde sich als Empfindlichkeit des photometrischen Verfahrens ergeben

$$e = A \cdot \frac{h}{H}$$

und es wäre nun die Änderung h der Lichtstärke durch die bei der Messung veränderliche Entfernung der Lichtquellen oder die übrigen veränderlichen Größen, Spannung des Lampenstromes beim Pyrometer, Schichtdicke beim Kolorimeter, Analysatordrehung oder Quarzkeilver-

Bild 30.



schiebung beim Polarisationsapparat, auszudrücken. Dabei zeigt sich, daß mit abnehmender Helligkeit H die Empfindlichkeitsgröße e nach der angegebenen Beziehung nicht mehr konstant bleibt, daß vielmehr bald der Einfluß des „Eigenlichtes" des Auges sich bemerkbar macht, so daß man zu der erweiterten Form des Gesetzes übergehen muß. Für Polarimeter beispielsweise würde die einfachere Form des Fechnerschen Gesetzes eine mit abnehmendem Halbschattenwinkel 2ε abnehmende Größe des Einstellungsfehlers ergeben. Der Versuch zeigt jedoch, daß dies nur bis zu einer bestimmten Größe des Halbschattenwinkels der Fall ist. Für sehr kleine Halbschattenwinkel wächst der Fehler, dessen Verlauf in Bild 30 dargestellt ist, wieder sehr stark an. (Der Fehler ist als

Ordinate in Sekunden, der Halbschattenwinkel als Abzisse in Grad aufgetragen.) Besser noch als bei der Veränderung des Halbschattenwinkels läßt sich die Abhängigkeit der Unterschiedsempfindlichkeit bei geeigneter Änderung der Lampenhelligkeit selbst nachweisen. Es ist aber auch bei dieser Feststellung zu berücksichtigen, daß die Größe des gereizten Netzhautbezirkes ebenso die Unterschiedsempfindlichkeit beeinflußt, wie es bei den Schwellenreizen (S. 36) bereits nachgewiesen war. Die folgende Zusammenstellung gibt den relativen Fehler bei Gleichheitseinstellung zweier mit scharfer Trennungslinse zusammenstoßender Teile einer Kreisfläche an, deren Sehwinkel in der ersten Spalte angegeben ist. Der Kopf der folgenden Spalten gibt die Relativwerte der Helligkeit an.

Sehwinkel	Relative Helligkeit				
	1	4	9	16	25
0,47°	56,5	15,0	9,2	4,6	12,5
0,94°	12,0	5,0	6,7	2,7	3,5
1,41°	7,0	2,9	3,7	1,5	2,3
1,88°	**3,7**	**1,8**	**1,8**	**1,3**	**1,0**
2,35°	4,5	2,2	1,9	1,7	1,5

Bezüglich der Helligkeit ist also, wie schon angegeben, ein Mindestwert bei der relativen Helligkeit 16 deutlich erkennbar; andererseits tritt für jede Helligkeit bei 1,88° Gesichtswinkel der Mindestfehler auf. Sind also die Bilder der beobachteten Felder wesentlich kleiner als der gelbe Fleck, so ist die Unterschiedsempfindlichkeit sehr gering. Mit zunehmender Größe des Netzhautbildes wächst die Einstellungsgenauigkeit, um das Maximum zu erreichen, wenn das Netzhautbild etwa den gelben Fleck ausfüllt. Ist das Netzhautbild noch größer, so findet wieder ein Anwachsen des Fehlers, mithin eine Abnahme der Genauigkeit statt. Da dieses Verhalten für alle photometrischen Messungen, gleichgültig in welcher besonderen Art der Vergleich ausgeführt wird und welche Strahlenart benutzt wird, das gleiche ist, so folgt hieraus, daß es für jede Anordnung eine günstigste Helligkeit geben muß. Wird z. B. bei Kolorimetern die Färbung zu stark oder zu schwach gewählt, so ist der Fehler größer als bei mittleren Konzentrationen.

Eine etwas abweichende Stellung nimmt das von Lummer und Pringsheim vorgeschlagene Interferenzphotometer ein. Für das Auftreten und Verschwinden der Streifen kann nicht der gleiche Wert der Empfindlichkeit, wie bei scharf begrenzten Feldern zugrunde gelegt werden, nämlich $\frac{1}{100}$, sondern ein etwas größerer Wert, da das Auge für allmählich erfolgende Helligkeitsänderungen nicht so empfindlich ist,

wie für sprungweise eintretende. Die Interferenzstreifen, deren Verschwinden das Zeichen für gleiche Helligkeit der die Streifen erzeugenden Lichtbündel ist, geben aber einen stetigen Übergang von Hell zu Dunkel; für sie gilt also ein Empfindlichkeitswert $> \frac{1}{100}$. Auch beim Wildschen Polaristrobometer ist die Einstellungsgenauigkeit bereits aus diesem Grunde geringer als bei Halbschattenpolarimetern.

§ 21. Vergleich verschiedenfarbiger Lichtquellen.

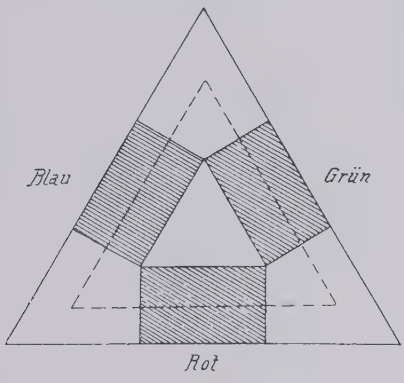
Während bei geringfügigen Farbenunterschieden eine Beurteilung gleicher Helligkeit zweier Felder noch ohne große Schwierigkeiten durchführbar ist, läßt sich die Vergleichung bei wesentlich verschiedener Farbe nach dem geschilderten Verfahren nicht mehr erreichen. Überdies wird die Helligkeit verschiedener Farben von verschiedenen Beobachtern nicht gleich empfunden, wie bereits aus dem Bestehen des Purkinjeschen Phänomens geschlossen werden kann. Wohl aber läßt sich auf anderem Wege eine Messung der Helligkeit durchführen, ohne daß der stets stark hervortretende Farbeneindruck den Helligkeitseindruck stört. L. Weber benutzte dazu Tafeln mit Schriftproben und stellte die Beleuchtungsstärke der zu vergleichenden Lichtquellen nacheinander so ein, daß gerade Buchstaben gleicher Größe noch gelesen werden konnten. Die Bestimmung der Pupillengröße, die ebenfalls mit der Helligkeit sich ändert, kann nicht in Betracht kommen, da einerseits die Größenänderung des Durchmessers im Vergleich zur Helligkeitsänderung nur geringfügig ist, andererseits aber auch durch andere Ursachen eine Änderung der Pupillengröße bedingt wird, wie beispielsweise bei der Akkommodation.

Eine größere Bedeutung kommt dem Flimmerphotometer zu, das darauf beruht, daß bei schnellem Wechsel zweier farbiger Reize sich ein gleichmäßiger Mischfarbenton einstellt, wenn die Helligkeiten der zu vergleichenden Farben gleich sind, wenn also der Reiz für beide Strahlenarten von gleicher Größe ist. Bei verschiedener Helligkeit oder aber bei zu geringer Wechselgeschwindigkeit tritt ein Flimmern auf. Mit Hilfe eines Motors wird eine optische Vorrichtung so in Bewegung gesetzt, daß das Licht der zu vergleichenden verschiedenartigen Lichtquellen nacheinander auf die gleiche Stelle der Netzhaut gebracht wird: Durch Änderung der Entfernung der Lichtquellen wird dann auf gleiche Helligkeit eingestellt.

Die praktische Bedeutung der Aufgabe wird klar, wenn man beachtet, daß bereits zwischen Bogenlampen und Glühlampen, Gasglühlicht und Hefnerlampe recht bedeutende Farbenunterschiede sich zeigen. Hefnerlampe und Kohlenfadenlampen haben gegenüber den anderen ein stark

ins rötliche spielendes Licht. Ein Ausweg, der die Benutzung der üblichen Photometerverfahren ermöglicht, ist dadurch gegeben, daß die Vergleichslampe mit Filtern versehen wird, die so gewählt sind, daß beim Verschieben die physiologische Helligkeit nicht verändert wird. Beim

Bild 31.



– – – – Begrenzung des Strahlenbündels.

Verschieben der in Bild 31 wiedergegebenen Blende können dann die Farbenanteile des Vergleichslichtes ohne physiologisch wahrnehmbare Helligkeitsschwankung innerhalb bestimmter Grenzen verändert werden. Bloch verwendet zu diesem Zwecke Schottsche Farbgläser.

§ 22. Objektive Photometrie.

Will man das Auge als Beobachtungsinstrument ausschalten und die von einer Lichtquelle ausgesandte, als „Licht" empfundene Energiemenge mit Hilfe rein physikalischer Methoden bestimmen, so ist es erforderlich, denjenigen Teil der Energiestrahlung auszuscheiden, der nicht auf das Auge wirkt. Ultrarote und ultraviolette Wellen müssen demnach vollkommen ausgeschieden werden; von den dem sichtbaren Spektrum angehörigen Wellenlängen aber müssen alle im Verhältnis der Empfindlichkeit der Zapfen geschwächt werden. Noch im Jahre 1914 wurde von W. und R. Pauli angegeben, daß die Lösung dieser Aufgabe infolge der Schwierigkeiten kaum gelingen würde. Nachdem umfangreiche Arbeiten von Ives, Kingsbury, Karrer und anderen gezeigt hatten, daß die Schwierigkeiten nicht unüberwindlich waren, gaben sie im Jahre 1918 wenigstens die Möglichkeit der Lösung zu. Es sind zu diesem Zwecke zwei Wege eingeschlagen worden. Einmal ist versucht worden die Ausscheidung und Schwächung durch ein vorgesetztes Filter zu erzielen, andererseits ist die Einschaltung einer Blende besonderer

Form gewählt worden. Entwirft man nach dem in Bild 26 angedeuteten Verfahren das Spektrum der Lichtquelle, so kann man durch eine Blende, deren Form aus der Empfindlichkeitskurve der Zapfen und der Farbenzerstreuung des Prismas zu bestimmen ist, die jeder Farbe zugehörige Lichtintensität durch Änderung der Höhe des Spektrums abschwächen. Vereinigt man die gesamte, von der Blende durchgelassene Strahlung durch eine geeignete optische Anordnung auf einer Thermosäule, die einen mit der Stärke der auffallenden Strahlung wachsenden Strom erzeugt, so ist damit die Aufgabe grundsätzlich gelöst.

Das Karrersche Filter, das ebenfalls eine richtige Abschwächung der verschiedenen Wellenlängen ergibt, besteht aus einem Gefäß aus Quarz, das in drei Schichten von 1,4 cm Dicke die folgenden Lösungen enthält:

Kupferchlorid	41,085	g/l
Kaliumbichromat	0,8346	„
Eisenchlorid	5,8712	„

An Stelle des Eisenchlorid wurde von Conrad Jodjodkaliumlösung benutzt. Die Zusammensetzung seines Filters war bezogen auf je 1 Liter Wasser

42,5 g $CuCl_2 + 2\,H_2O$	in	1,4	cm Schichtdicke
0,7745 g $K_2\,Cr_2\,O_7$	„	1,35	„ „
0,0562 g J + 0,4356 g KJ	„	1,45	„ „

Dieses Filter, welches in Glasgefäßen verwendet wurde, hat den Vorteil, daß die Jodjodkaliumlösung im Gegensatz zur Eisenchloridlösung monatelang haltbar war.

Stellt man die Durchlässigkeit dieses Filters in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes dar, so ergibt sich ein Linienzug, der innerhalb der Fehlergrenzen mit der Ivesschen und Benderschen Empfindlichkeitskurve für die Zäpfchen gut übereinstimmt. Ultrarot und Ultraviolett wird nahezu vollständig absorbiert; das Maximum der Durchlässigkeit mit etwa 0,7 der Energie des einfallenden Lichtes liegt bei der Wellenlänge 546,7 $\mu\mu$. Zum Vergleich sei die auf Seite 51 folgende Tabelle gegeben.

Eine Lichtquelle wird um so besser ihrem Zwecke, auf das Auge wirkende Strahlung auszusenden, entsprechen, je mehr von der gesamten ausgestrahlten Energie vom Auge aufgenommen wird. Die vom Auge in Lichtempfindung umgesetzte Energiemenge ist aber als gleich zu betrachten der vom Karrerschen Filter durchgelassenen. Das Verhältnis dieser Energiemenge zu der gesamten ausgestrahlten Energie wird als „visueller Nutzeffekt“ oder als „photometrische Ökonomie“ P bezeichnet. Wohl ist für Körper, die infolge ihrer hohen Temperatur allein strahlen, ein Anwachsen der gesamten Strahlung mit der Temperatursteigerung

Wellenlänge in $\mu\mu$	Helligkeitsempfindlichkeit nach		Relative Durchlässigkeit des Filters
	Ives	Bender	
435,8	—	—	1,13
440	1,74	5,82	1,3
460	4,38	10,68	3,55
480	9,25	18,3	10,7
500	21,75	31,9	29,9
510	35,7	38,6	41,7
520	47,6	49,3	51,4
530	54,6	56,9	57,3
540	58,6	59,35	59,7
546,7	—	—	60,0
550	60,0	60,0	59,85
560	59,4	57,5	57,9
570	56,9	56,1	54,5
580	52,5	50,4	49,6
600	38,1	37,8	36,6
620	23,0	22,13	23,8
640	10,5	11,04	12,15
660	4,08	4,02	4,6

festzustellen, und gleichzeitig eine Verschiebung des Maximums der Ausstrahlung nach kurzen Wellenlängen hin, so daß das anfangs im Gebiet unsichtbarer Wärmewellen gelegene Maximum bei etwa 2000° abs. ins sichtbare Wellenlängengebiet übertritt, doch wächst die photometrische Ökonomie nicht unbegrenzt mit der Temperatur. Wie das Maximum der Strahlung bei etwa 6000°, der Sonnentemperatur, über die Wellenlänge größter Empfindlichkeit des Auges hinwegwandert, so erreicht die photometrische Ökonomie bei etwa 6000° für reine Temperaturstrahler ihr Maximum im Betrage von 0,15. Dieser auf Grund der Strahlungsgesetze und der Empfindlichkeit des Auges ermittelte Wert wurde auch unter Benutzung des Karrer-Conradschen Filters für die Sonnenstrahlung wiedergefunden. Für die als Lichtquellen benutzten Temperaturstrahler bleiben die Werte der photometrischen Ökonomie viel kleiner und hängen naturgemäß stark von der Temperatur, d. h. bei Glühlampen von der Belastung ab. Für Kohlenfadenlampen ist P günstigen Falles 0,02, für eine Quecksilberbogenlampe 0,07, während für eine Bogenlampe mit Effektkohlen, die ebenso wie die Quecksilberbogenlampe nicht mehr als Temperaturstrahler zu betrachten ist, Werte bis zu 0,28 für P gefunden wurden. Für den Idealfall, daß die Lichtquelle nur sichtbare Wellen ausstrahlt, würde eine photometrische Ökonomie von etwa 0,30 zu erreichen sein, falls diese Energieverteilung wie bei einem Temperatur-

strahler (schwarzer Körper) von 4200° Temperatur wäre. Der Wert 1 könnte nur auftreten, wenn alle Energie in der Wellenlänge 550 $\mu\mu$, die dem Maximum der Zapfenempfindlichkeit entspricht, ausgesandt würde.

Unter Berücksichtigung der physiologischen Besonderheiten des Auges läßt sich zeigen, daß die höchste Lichtausbeute, ausgedrückt in Hefnerkerzen, bei einem Energieaufwand von 1 Watt etwa 64 ist. Die verschiedenen, für diese Grenzzahl angegebenen Werte bewegen sich zwischen 55 und 73. Bezüglich des praktisch erreichten Ausnutzungsgrades gibt eine von Schröder zusammengestellte Tabelle Anhaltspunkte; für einige neuere Elektrolumineszenzlampen ist:

Gas oder Dampf	Entladungsform	Stromart	HK/W	HK/W red.
Helium	Glimmerladung	Gleichstrom	0,34	—
Stickstoff	Glimmerladung	Wechselstrom	0,67	0,75
Helium	Vakuumbogen	Gleichstrom	0,63	1,11
Neon	Glimmerladung	Wechselstrom	1,45	2,38
Neon	Vakuumbogen	Gleichstrom	2,00	3,57
Quecksilber	Vakuumbogen	Gleichstrom	2,63	3,99
Quecksilber	Hochdruckbogen	Gleichstrom	4,80	6,40
Quecksilber-Kadmium	Hochdruckbogen	Gleichstrom	6,25	—
Natrium-Kalzium	Effektbogen	Drehstrom	11,36	—
Quecksilber + Metallsalze	Salzdampfbogenlampe von Nernst	Gleichstrom	6,25	—

Die in der letzten Spalte gegebenen Werte beziehen sich auf die mittleren sphärischen Hefnerkerzen, im Gegensatz zu den in der vorletzten Spalte angegebenen Werten für die horizontal gemessenen Hefnerkerzen.

Die ganzen Ausführungen gelten aber nur so lange, als die Zapfen allein als wirksam vorausgesetzt werden und unter der Voraussetzung, daß die Helligkeitswerte verschiedener Farben eindeutig miteinander vergleichbar sind. Ändert sich der Adaptationszustand, so ist naturgemäß keines der Verfahren der heterochromen Photometrie mehr anwendbar. Für praktische Zwecke, vor allem für die Messung des Helligkeitswertes der gebräuchlichen Lichtquellen, deren Färbungsdifferenz so erheblich werden kann, daß sie unmittelbar nicht mehr miteinander verglichen werden können, ist in den beschriebenen Methoden ein bereits durch zahlreiche Versuche als brauchbar erwiesener Weg zum Vergleich vorgeschrieben.

Abschnitt IV.

Die Sehschärfe.

§ 23. Das Auflösungs- und Wahrnehmungsvermögen.

Da die Netzhaut räumlich ausgedehnte Empfangselemente aufweist, so wird jedem dieser Elemente stets ein endlich großer, wenn auch kleiner Sehwinkel entsprechen. Die Bilder aller innerhalb dieses Sehwinkels befindlichen Gegenstände wirken gleichzeitig auf ein Stäbchen oder Zäpfchen und können nicht mehr getrennt wahrgenommen werden. Erinnert man sich wieder der Tatsache, daß die Empfangsapparate in der Netzhautgrube am dichtesten gestellt sind, nach dem Rande zu in immer größeren Abständen sich vorfinden, so ist zu folgern, daß, wie Helmholtz sagt, das Gesichtsfeld, das auf der Netzhaut abgebildet wird, einer Zeichnung entspricht, in der der mittlere Teil fein und sauber ausgeführt, während der Rand nur grob skizziert ist.

Fragt man sich nun, wie groß der Winkel sein muß, unter dem zwei leuchtende Punkte erscheinen müssen, um noch als getrennt wahrgenommen werden zu können, so ist als Bedingung zu stellen, daß der Abstand ihrer Bilder auf der Netzhaut größer ist als der Durchmesser eines Netzhautelementes. Nur wenn zwischen den gereizten Netzhautelementen wenigstens eines liegt, das einen schwächeren oder gar keinen Reiz anzeigt, ist die Trennung möglich. Nimmt man als mittleren Durchmesser eines Zäpfchens 0,004 mm und wählt für den Abstand des Knotenpunktes den Wert 15 mm, so folgt für den Winkel w, der den Grenzwert des Auflösungsvermögens darstellt,

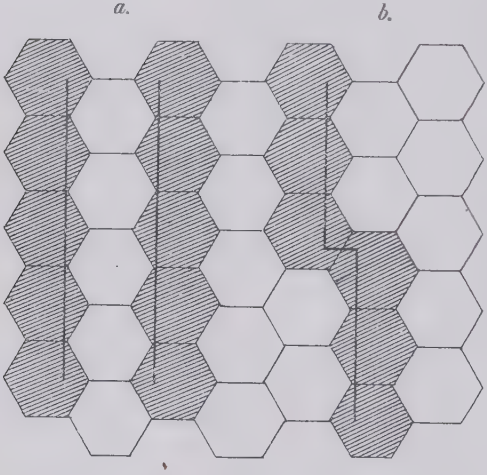
$$w = \frac{0{,}004}{15}$$

im Winkelmaß gemessen also etwa 1 Bogenminute. Dieser für die Mitte des Auges geltende Wert ist auch von Hooke bei Beobachtung von Doppelsternen gefunden worden. Daß diese Größe des „physiologischen Grenzwinkels“ nur einen Näherungswert darstellen kann, geht daraus hervor, daß der Durchmesser der Zapfen von Mensch zu Mensch verschieden ist. Bei einem Durchmesser von 0,002 mm würde sich etwa

30″ ergeben, und es sind derartige Werte auch schon beobachtet worden, was demnach keineswegs als Widerspruch betrachtet werden kann.

Die gleiche Überlegung gilt auch für die Auflösung eines Systems von hellen und dunklen Linien. Bild 32 a gibt die durch die schwarzen parallelen Linien gereizten Netzhautelemente gestrichelt wieder. Auch für den Winkelabstand dieser Linien würde demnach der physiologische Grenzwinkel von etwa 60″ anzunehmen sein. Bedingung dafür, daß dieser Grenzwert wirklich erreicht wird, ist, daß die Helligkeit der zu trennenden Striche gegenüber dem Grund oder der des Grundes gegen die Striche so groß ist, daß die Netzhautelemente den Unterschied noch leicht wahrzunehmen vermögen. Ist der Helligkeitsunterschied gering, so tritt, wie aus den Gesetzen für die photometrische Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Feldgröße sich ergibt, eine Abnahme der Sehschärfe ein, ebenso auch wächst der Grenzwinkel für sehr starke und sehr schwache Beleuchtung.

Bild 32.



Streng zu unterscheiden von der eben angegebenen „Grenze der Auflösungsfähigkeit" ist die „Wahrnehmungsmöglichkeit". Handelt es sich bei dem Auflösungsvermögen um die Trennung zweier heller Punkte oder eines hellen Streifensystems auf dunklem Grunde, so kann ein einzelner dunkler Gegenstand auf hellem Grunde (fliegender Vogel gegen den Himmel) oder ein leuchtender Gegenstand auf dunklem Grunde noch wahrgenommen werden, wenn sein geometrisches Bild nur einen geringen Teil des Netzhautelementes bedeckt, vorausgesetzt natürlich, daß die Reizung des betreffenden Netzhautelementes von der der umliegenden so verschieden ist, daß der Unterschied für Tageslichtsehen wenigstens 0,01 beträgt. Daß sie merklich größer sein muß, wenn die Bildfläche nur einen sehr kleinen Teil der Fläche eines Netzhautelementes ausmacht, ist aus den Messungen von Gehlhoff und Schering (S. 36) zu ersehen. Selbst bei Sehwinkeln von 0,17″ ist noch bei hinreichendem Helligkeitsunterschied eine Wahrnehmung irdischer Lichtquellen möglich, wie ja auch Sterne noch sichtbar sind, deren Durchmesser diesen Betrag unterschreitet.

§ 24. Die Abhängigkeit des Auflösungsvermögens von der Helligkeit und dem Netzhautort.

Der für zentrales Sehen und mittlere Helligkeit angegebene Wert des physiologischen Grenzwinkels von 60″ wächst, sobald die Helligkeit abnimmt. Nach Tob. Mayer ist die Abhängigkeit des Grenzwinkels w von der Helligkeit h gegeben durch

$$w = \frac{w_0}{\sqrt[6]{h}}.$$

Während für die Zapfen nur eine geringe Adaptationsfähigkeit vorhanden ist, der physiologische Grenzwinkel also bald sehr erhebliche Größen annehmen muß, ist für die Stäbchen in der Empfindlichkeitszunahme ein Mittel gegeben, um die geringere Sehschärfe bis zu einem gewissen Grade auszugleichen. Nach Ficks Messungen, die grundsätzlich das gleiche Ergebnis hatten, wie frühere Messungen von Dor, nimmt nämlich für Tageslichtsehen die Sehschärfe von der Netzhautgrube an sehr schnell ab (Bild 33, ausgezogene Kurve). Daß bei Dunkeladaptation die Sehschärfe für die außerhalb der Fovea gelegenen Teile kaum abnimmt, während die Sehschärfe in der Fovea selbst sehr stark sich vermindert (gestrichelte Kurve in Bild 33), ist auf die nach dem Rande der Netzhaut stark zunehmende Lichtempfindlichkeit zurückzuführen (vgl. Bild 25). Wenn dennoch das Unterscheidungsvermögen im Dunkeln merklich geringer gefunden wird, als nach den aus den Kurven zu entnehmenden Werten zu folgern wäre, so ist darauf hinzuweisen, daß das Auge das Bestreben hat, sich stets so einzustellen, daß das Bild auf den gelben Fleck fällt; nur bei großer Übung läßt sich das Bild in dem Stäbchenteile der Netzhaut, der vermöge seiner großen Lichtempfindlichkeit im Zustande der Dunkeladaptation für die Aufnahme schwacher Reize besonders geeignet izt, festhalten; das Erkennen wird erschwert durch die selbsttätig einsetzenden Augenbewegungen, die das Bild dauernd auf verschiedenen Netzhautteilen entstehen lassen. Bei zu geringer Dauer des Lichtreizes wird aber eine genaue Wahrnehmung des Bildes unmöglich, weil eine zu flüchtige Reizung, ähnlich zu geringer Belichtungsdauer bei photographischen Platten, zur Erzeugung eines sichtbaren Bildes überhaupt nicht ausreicht: der Schwellenreiz wird nicht überschritten. Entsprechendes gilt auch für die Wahrnehmungsfähigkeit. Mangels hinreichenden Beobachtungsmaterials läßt sich aber zahlenmäßig über die Werte der physiologischen Grenzwinkel für die verschiedenen Teile der Netzhaut wenig aussagen, für die Wahrnehmbarkeit noch weniger als für die Sehschärfe, zumal eine genaue Kennzeichnung des Adaptationszustandes nicht möglich ist.

Bild 33.

180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
60° 40° 20° 0° 20° 40° 60°
Rechtes Auge.
60° 40° 20° 0° 20° 40° 60°
Linkes Auge.

Ebenfalls wenig erforscht ist der Einfluß der Bewegung eines Gegenstandes auf Wahrnehmbarkeit und Erkennbarkeit. Bei schnellen Bewegungen werden die einzelnen, zeitlich aufeinanderfolgenden Phasen nicht mehr getrennt wahrgenommen, sondern sie verschmelzen, selbst wenn die Bewegung ruckweise erfolgt, zu einem einheitlichen Gesamtbild. Andererseits ist es eine alte Erfahrung, daß durch Bewegung das Auffinden eines unter kleinem Sehwinkel erscheinenden Körpers erleichtert wird. Fliegende Vögel, fliehendes Wild, werden noch wahrgenommen, wenn ruhende Gegenstände gleicher Winkelgröße dem Blick entschwinden. Dies gilt ganz besonders für die Randbezirke der Netzhaut, welche trotz ihrer infolge Verteilung und Abstand der lichtempfindlichen Elemente ungünstigeren Auflösungsfähigkeit nach Aubert und Exner noch Veränderungen wahrzunehmen gestatten, die kleiner sind als der geringste, an der Stelle deutlichsten Sehens bei ruhendem Objekt noch unterscheidbare Abstand. Sind demnach die äußeren Netzhautteile besonders für die schnelle Auffassung geringfügiger Bewegungsvorgänge geeignet, so gilt dies doch in schwächerem Maße auch für die Netzhautgrube und ihre Umgebung. Die Erhöhung der Wahrnehmungsfähigkeit in der Netzhautgrube ist darauf zurückzuführen, daß zeitlich nacheinander verschiedene Netzhautelemente gereizt werden. Nur so wird es verständlich, wenn Basler angibt, daß an der Stelle deutlichsten Sehens noch Bewegungen von 20 Winkelsekunden Größe und $^1/_{15}$ Zeitsekunde Dauer erkannt werden. Wird andererseits der Wechsel zu schnell, so verwischt sich der Bewegungseindruck.

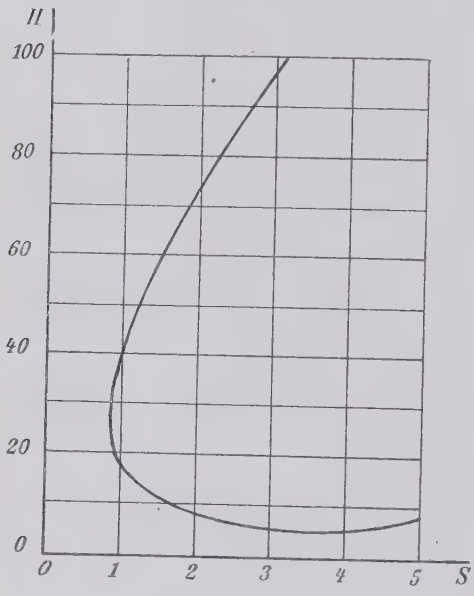
Versuche von Schulz haben eine Bestätigung dieser Beobachtungen ergeben. Bei unbewegtem Objekt waren Gitterstriche noch deutlich zu trennen, wenn ihr Sehwinkel etwa 50 Sekunden betrug. Bei bewegten Gittern zeigte sich für Wechsel von weniger als $^1/_{20}$ Sekunde noch deutlich bessere Erkennbarkeit, also eine Abnahme der Sehwinkelgröße.

Für photographische Aufnahmen wird allgemein angenommen, daß eine Unschärfe von 0,1 mm noch nicht störend wirkt. Für den normalen Betrachtungsabstand von 250 mm entspricht dies einem Sehwinkel von 1,4 Winkelminuten. Wie Gleichen angibt, kann man für die Betrachtung photographischer Bilder sogar noch einen höheren Wert der Unschärfe zulassen (etwa 1,7'), was auch durch die stets vorhandenen Übergänge und die Wirkung des Kornes erklärlich ist. Liegt doch die Korngröße photographischer Platten schon in der Größenordnung von 0,01 mm.

§ 25. Noniensehschärfe.

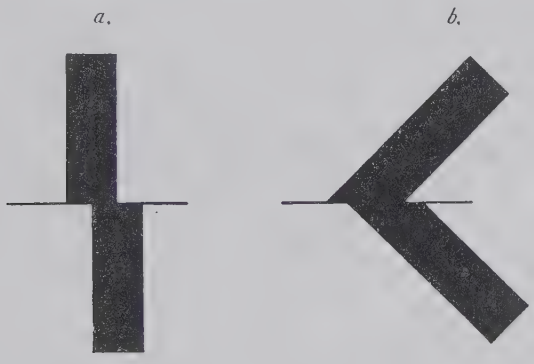
Wülfing hat als Wert des physiologischen Grenzwinkels für die Verschiebung zweier Spalten gegeneinander senkrecht zur Längsrichtung der Spalte im Gegensatz zu der Punktsehschärfe 12″ gefunden. Daß in der Tat die Schärfe der „Breitenwahrnehmung“, die von Pauli ohne ersichtlichen Grund als „Feinheit des optischen Raumsinnes“ bezeichnet wird, einen geringeren Wert als die Punktsehschärfe haben muß, geht bereits aus Bild 33 b hervor. Obwohl der seitliche Abstand der gegeneinander verschobenen, als Nonienstriche zu deutenden Graden kleiner ist als der mittlere Durchmesser eines Zapfens, werden zwei verschiedene Reihen von Netzhautelementen erregt. Dabei darf aber nicht unberücksichtigt bleiben, daß mit abnehmender Länge der Teilstriche der Abstand immer größer werden muß, um eine Trennung zu erreichen, um endlich, sobald die Länge der Geraden im Winkelmaß den Durchmesser eines Netzhautelementes erreicht, dem für die Trennung zweier Punkte nötigen Abstand gleich zu werden. Die „Noniensehschärfe“ ist also keineswegs konstant zu setzen, sondern ist abhängig von der Länge der Striche. Eine umfangreiche Beobachtungsreihe, die von Schulz unter Heranziehung von mehr als 200 Personen durchgeführt worden ist, hat ergeben, daß die als Verschiebung s gemessene Größe der Noniensehschärfe durch die Länge der Striche H in der Weise gegeben ist, daß zunächst für die Höhe 6, entsprechend 60 Sekunden im Winkelmaß eine Verschiebung $s = 3{,}5$, entsprechend 35 Sekunden erforderlich ist (Bild 34). Für wachsende Höhe H nimmt die erforderliche Verschiebung s ab, um für $H = 28$ ($= 280''$) einen Mindestwert von $s = 0{,}8$ ($= 8''$) zu erreichen. Mit weiter wachsender Höhe nimmt die Verschiebungsgrenze s wieder zu. Diese Zunahme ist auf die Mitwirkung der an der Grenze des gelben Fleckes liegenden Netzhautelemente zurückzuführen, an welcher Stelle die Anordnung nicht mehr die Regelmäßigkeit aufweist, wie in der Mitte der

Bild 34.



Fovea, also ein Übergreifen der einzelnen Reihen der Netzhautelemente anzunehmen ist. Ähnliche Ergebnisse wie diese teilweise mit rohen Mitteln ausgeführten Versuche hatten Laboratoriumsbeobachtungen von v. Hofe, bei denen jedoch festgestellt wurde, daß unter günstigsten Bedingungen sogar „Noniensehschärfen" von etwa 3″ erreicht werden können. Außer von der Höhe der Striche hängt nämlich der Wert der Noniensehschärfe noch von der Strichbreite, der Form der Striche, der Art der Berührung und der Beleuchtung ab. Abgesehen von ihrer Anwendung auf die Einstellung von Nonien haben diese Beobachtungen noch Bedeutung für die Beurteilung der Meßgenauigkeit optischer Entfernungsmesser. Bei diesen werden in den Gesichtsfeldhälften Teilbilder des angemessenen Gegenstandes erzeugt; Aufgabe des Messenden ist es dann, diese so einzustellen, daß die Teilbilder zum Gesamtbild sich ergänzen oder als Spiegelbilder an der Trennungslinie ohne seitliche Verschiebung erscheinen. Die Stellung der Teilbilder ist in Bild 35 angedeutet. Die oberhalb und unterhalb der Trennungslinie liegenden Bildteile sollen nach der Einstellung keine seitliche Verschiebung aufweisen; physikalisch liegt also die gleiche Beobachtung vor wie bei Ablesung von Nonien, nur kann Form, Ausdehnung, Farbe und vor allem Neigung gegen die Trennungslinie außerordentlich mannigfaltig sein. Wie auch zu erwarten, haben die Messungen gezeigt, daß bei Neigung gegen die Trennungslinie (Bild 35 b) die Einstellungsgenauigkeit geringer ist als bei senkrechter Stellung. Bezüglich des Einflusses der Form läßt sich nur nachweisen, daß physiologische Verschiedenheiten vorliegen.

Bild 35.



§ 26. Die Bedeutung der Sehschärfe für die messende Physik.

Nicht nur bei der Ablesung von Nonien, sondern auch bei Ablesung einfacher Teilungen mit schwingendem Zeiger, bei der Abschätzung von Bruchteilen eines bestimmten Skalenintervalles und bei Einstellung des

Meßfadens eines Mikroskopes läßt sich die Genauigkeit der Ablesung aus der Sehschärfe ermitteln. Soll die Skala einer chemischen Wage noch auf $^1/_{10}$ Intervallgröße abgelesen werden, so ist zu fordern, daß dieser kleinste zu schätzende Bruchteil für das beobachtende Auge unter einem Winkel erscheint, der wenigstens dem physiologischen Grenzwinkel der Punktsehschärfe, der mit 50″ angenommen werden mag, gleich ist. Für einen Beobachtungsabstand von 250 mm folgt daraus allgemein für den Mindestabstand ^{x}min. einer auf $^1/_{10}$ abzulesenden Teilung

$$^x\text{min.} = 250 \,.\, 10 \,.\, \text{tg}\, 50'' = 0{,}6 \text{ mm}.$$

Leman hat aus praktischen Beobachtungen abgeleitet, daß das Minimum der Länge eines durch 10 zu teilenden Intervalles nicht unter 0,8 mm liegen soll. Wenn auch für die Ablesung der Augenabstand meist kleiner als 250 mm ist, der berechnete Mindestwert also noch wesentlich verkleinert werden müßte, so ist doch andererseits wiederum eine Vergrößerung deshalb erforderlich, weil die Strichdicke selbst berücksichtigt werden muß. Die Übereinstimmung ist jedenfalls als völlig genügend zu betrachten, und erst neuerdings ist eine Bestätigung des Lemanschen Wertes durch Toussaint erfolgt, der als Grenze 0,7 mm angibt, und Teilungen von 0,5 mm direkt als schädlich bezeichnet.

Es ist jedoch damit nicht gesagt, daß eine solche Schätzung wirklich fehlerfrei ausgeführt wird. Selbst für geübte Beobachter treten Fehler auf, die von der Größe des Intervalles abhängen und etwa $^1/_{20}$ Intervallgröße betragen, im allgemeinen aber mit der Intervallgröße zunehmen. Es läßt sich daraus berechnen, daß der reine Beobachtungsfehler bei einer chemischen Wage, deren Empfindlichkeit bei 50 g Belastung 1,5 Skalenteile auf 1 mg beträgt, etwa 0,13 mg ist.

Ganz ähnlich ist auch der Fehler bei Einstellung mit Meßfäden. Für die Einstellung eines einzelnen Fadens auf die Mitte eines zu messenden Intervalles ist ein systematischer Fehler nachgewiesen, der sich darin äußert, daß die nach der Nasenseite zu gelegene Seite des geteilten Intervalles bei normal gebauten Augen überschätzt wird. Diese Tatsache wird von Kritzinger darauf zurückgeführt, daß der die Netzhautgrube umschließende Wall auf der nasalen Seite des Auges dicker ist und infolgedessen die Bilder beider Intervallteile nicht den gleichen Reiz hervorbringen können. Die Annahmen Kritzingers geben eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungswerten Hartmanns, und begründen gleichzeitig, daß der konstante Fehler der Mittenschätzung von einer bestimmten Intervallgröße an sich nicht mehr ändert, die aber vom Bau des Auges abhängig ist.

Aus den Ausführungen über Noniensehschärfe ist zu entnehmen, daß die günstigste Strichlänge der Teilungen etwa mit

$$250 \,.\, \text{tg}\, 280'' = 0{,}3 \text{ mm}$$

anzunehmen ist, wenn die Sehweite mit 250 mm angesetzt wird. Da die Strichlänge aus praktischen Gründen meist größer ist, wird der Ablesungsfehler auch über den günstigsten Wert von 10″ etwa hinausgehen und man erhält bei Noninusablesung eine Grenzleistung von

$$250 \times \operatorname{tg} 15'' = 0{,}018 \text{ mm}.$$

Nach Toussaint ist jedoch als nutzbarer Wert der Ablesungsgenauigkeit bei direkter Beobachtung 0,05 mm zu wählen, woraus er für die Durchmesser mit Nonien abzulesender Teilkreise in Abhängigkeit von der gewünschten Ablesungsgenauigkeit die Werte ermittelt:

Ablesungsgenauigkeit	Durchmesser des Teilkreises
4′	86 mm
2′	172 „
1′	344 „
40″	516 „
20″	1032 „
10″	2064 „

Schlechtriem und R. Seeliger haben den unter bestimmten atmosphärischen Verhältnissen erreichbaren Grad der Sehschärfe benutzt, um den Einfluß des diffus reflektierten Lichtes und der Luftabsorption auf die Sichtbarkeit festzustellen und definieren als Formsichtigkeit die eben noch wahrgenommene Streifenbreite bei einem Gitter aus schwarzen und weißen Strichen. Wird dann als Kontrastsichtigkeit der Helligkeitsunterschied genommen, der gerade noch erkannt werden kann, so läßt sich sowohl die Abweichung vom gradlinigen Strahlenverlauf in der zwischen Ziel und Beobachter liegenden Luftschicht als auch die Absorption feststellen.

Neuerdings sind Sehschärfeprüfungen, denen sowohl die Methode der Mitteneinstellungen wie der Nonienablesung zugrunde gelegt wird, von Moede für die psychotechnische Berufsprüfung verwendet worden.

§ 27. Die ärztliche Bestimmung der Sehschärfe.

Zur Bestimmung der Sehschärfe können die verschiedensten Sehzeichen benutzt werden. Meist werden hierzu Buchstaben verschiedener Größe verwendet, die so beschaffen sind, daß die Dicke der Striche $^1/_5$ der Höhe und Breite des Buchstabens beträgt (Bild 36). Ein Auge hat die Sehschärfe „Eins“, wenn der Buchstabe noch in einer solchen Entfernung erkannt wird, daß die Strichdicke unter einem Winkel von 1 Minute erscheint. Nimmt man als Grundentfernung 6 m, so würde also die Strichdicke 1,62 mm betragen. Die Prüfungstafeln, die Snellen angegeben hat, enthalten nur Buchstabenreihen verschiedener Größe, die

so geordnet sind, daß aus der Größe der noch erkannten Buchstabenreihe die Sehschärfe in Sechsteln der normalen entnommen werden kann. Bei den Sehprobetafeln, die anstelle der Buchstaben auch Zahlen, Haken oder

Bild 36.

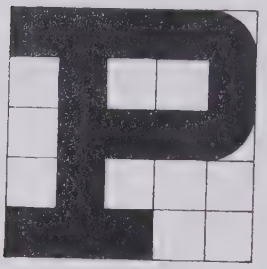
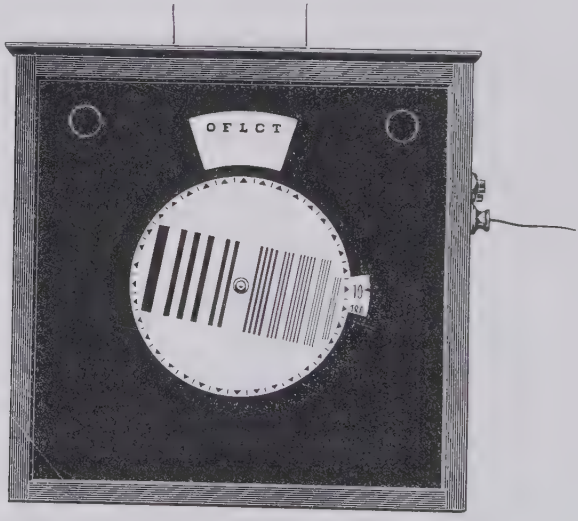


Bild 37.

die Landoltschen Ringe (Bild 37) enthalten können, ist den einzelnen Reihen meist die Entfernung in Metern beigefügt, auf die ein normales Auge die Buchstaben noch erkennen kann. Wird also von einem Beob-

Bild 38.



achter die mit 36 bezeichnete Reihe noch erkannt, während das normale Auge in der Entfernung 6 m die mit 6 bezeichnete Reihe noch auflöst, so ist die Sehschärfe $\frac{6}{36} = {}^1/_6$.

Neuerdings sind von Kloth Sehprobentafeln eingeführt, die an Stelle der Buchstaben oder in Verbindung mit ihnen Strichgitter in verschiedener Lage benutzen (Bild 38).

Von großer Wichtigkeit sind hierbei die Beleuchtungsverhältnisse, wie schon aus Bild 24 zu entnehmen ist. Außer von der Intensität hängt die Sehschärfe noch von der Farbe ab. Bei kurzwelligem Licht ist die Sehschärfe geringer als für langwelliges; nach W. und R. Pauli ist das Verhältnis der Sehschärfen in gleichhellen, verschiedenfarbigen Lichtern bei gesättigten Farben

Blau : Weiß = 1 : 5,74
Grün : Weiß = 1 : 4,26
Rot : Weiß = 1 : 2,27
Gelb : Weiß = 1 : 1,27

Die Helligkeit ist dabei als photometrische Helligkeit ermittelt. Es geht hieraus hervor, daß selbst bei gleichem Adaptationszustande die photometrische und die Sehschärfenmethode wesentlich verschiedene Werte für die Helligkeit ergeben, daß also je nach Verwendungszweck des Lichtes sein Beleuchtungswert verändert sein kann. Die praktische Bedeutung dieser Unterschiede ist jedoch nicht allzu groß, da Beleuchtung mit stark gefärbten Lichtquellen nur selten für Arbeitszwecke in Frage kommt; die bekannteste Verwendung farbigen Lichtes ist die Dunkelkammerbeleuchtung für photographische Arbeiten. Die Farbe und Helligkeit wird in erster Linie durch die Art des verarbeiteten Materials bestimmt; bezüglich der physiologischen Helligkeitswerte können die angegebenen Zahlen nichts aussagen, da sie für Helladaptation gelten, während bei der Arbeit in der Dunkelkammer vorwiegend Dunkeladaptation des Auges vorliegt.

Tscherning hat neuerdings ein physiologisches Maß der Helligkeit angegeben, das eine unmittelbare Bestimmung des Helligkeitsgrades für beliebige Lichtquellen gestattet. Durch vielfache Spiegelung eines beleuchteten Spaltes wird das Licht geschwächt, bis das Bild verschwindet. Bei seinen Messungen stellte Tscherning einen einfachen Zusammenhang der von ihm gewählten physiologischen Einheit des Helligkeitsgrades c mit der astronomischen Größenklasse m der Gestirne fest, in der Form

$$c = 2{,}53 - 0{,}4\,m,$$

ferner ermittelte er, daß für eine Beleuchtungsstärke von 12 Meterkerzen noch die volle Sehschärfe vorliegt, während sie für $^1/_9$ Meterkerze bereits auf $^1/_{10}$ herabgesetzt ist.

§ 28. Sehschärfe und Akkommodation.

Betrachtet man ein auf Unendlich eingestelltes Auge und läßt einen sehr kleinen leuchtenden Gegenstand auf das Auge zuwandern, so wird mit abnehmender Entfernung desselben vom Auge, wenn dieses seinen Akkom-

modationszustand beibehält, zwar der Bildort sich immer mehr von der Netzhaut entfernen, der Durchmesser des auf der Netzhaut entstehenden Lichtfleckes (vgl. Bild 15 und 16) aber immer noch kleiner bleiben, als der Durchmesser eines Netzhautelementes. Eine einfache Rechnung zeigt, daß bei 4 mm Pupillendurchmesser der Lichtfleck erst dann die Größe eines Zapfens überschreitet, wenn der Gegenstand bis auf 14 m etwa genähert ist; bei 2 mm Durchmesser der Augenpupille kann dieser Abstand bis auf etwa 7 m abnehmen. Ist damit schon gezeigt, daß für jeden Akkommodationszustand nicht nur Gegenstände in einer bestimmten Entfernung, sondern innerhalb eines ganzen Raumgebietes scharf gesehen werden, so ist andererseits auch klar, daß ein Akkommodationswechsel nur bei starken Entfernungsänderungen der beobachteten Gegenstände in Frage kommt. Die Größe des bei einem bestimmten Akkommodationszustande gleichzeitig scharf gesehenen Raumgebietes kann als Sehtiefe bezeichnet werden. Diese der „Tiefe“ eines photographischen Objektivs vergleichbare Größe ist bei großer Entfernung des Akkommodationspunktes sehr groß und nimmt mit Verringerung seiner Entfernung ab. Beim Nahpunkt beträgt die Sehtiefe für 4 mm Pupillendurchmesser nur noch etwa 3 mm.

Die Abhängigkeit der Sehtiefe vom Pupillendurchmesser bewirkt, daß bei geringer Helligkeit, bei der die Pupille sehr groß und die Sehtiefe infolgedessen sehr klein ist, häufigerer Akkommodationswechsel erforderlich ist und daß bei ungenauer Akkommodation die Sehschärfe sehr stark abnimmt. Namentlich bei sehr geringen Helligkeitsgraden, die in der Nähe der Reizschwelle der Zapfen liegen, kann beobachtet werden, daß nahe Gegenstände (Schriftproben, feine Zeichnungen) bald erkannt werden, bald verschwimmen. Die Ermüdung des Auges beim Lesen im Dämmerlicht ist größtenteils auf den häufig eintretenden Akkommodationswechsel zurückzuführen, ebenso die Anstrengung, die beim Photometrieren schwach beleuchteter Felder auftritt. Während bei mittlerer Helligkeit 20—30 Messungen leicht ausgeführt werden können, ist bei geringer Helligkeit meist schon nach 2—3 Messungen eine Ruhepause nötig. Da bei vielen physikalischen und technischen Messungen überdies noch häufiger Wechsel des Adaptationszustandes erforderlich (z. B. bei Polarisationsapparaten) ist, so sollte in allen Fällen darauf geachtet werden, daß wenigstens die günstigsten Bedingungen für die Beobachtung gewählt werden, daß also das Auge möglichst dauernd auf Unendlich akkommodiert bleibt.

Abschnitt V.

Die Farbenempfindungen.

§ 29. Die Spektralfarben.

Da die Farben als Elemente des Gesehenen reine Empfindungen sind, denen in dem außerhalb des Auges vorhandenen Licht nichts zugeordnet werden kann, was unmittelbar nach Größe und Wirkung mit der empfundenen Farbe verglichen werden kann, so scheint der geeignetste Weg zur Untersuchung der Gesetze zu sein, nach denen die Farbenempfindungen miteinander verknüpft werden, von den einfachsten Farbenempfindungen auszugehen und die ihnen äquivalenten Vorgänge in der Natur aufzusuchen. Dieser Weg würde vielleicht für die ästhetische und psychologische Behandlung der Farbenempfindungen geeignet sein, keinesfalls aber für die Lösung der physiologisch-physikalischen Fragen. Während es bisher noch nicht eindeutig festgestellt ist, was als einfachste Farbenempfindung aufzufassen ist, kann sehr wohl die physikalisch einfachste Form der Übermittlung von Lichtenergie angegeben und verwirklicht werden. Da außerdem die gleiche Farbenempfindung durch verschiedene Ursachen bewirkt werden kann, der physiologische Eindruck also vieldeutig sein kann, so bleibt als einziger Weg zur Erforschung der Empfindungsgesetze, die den einfachsten physikalischen Vorgängen zugeordneten Empfindungen als Ausgangspunkt der Betrachtungen zu wählen.

Der einfachste Vorgang der Ausbreitung der Lichtenergie ist dann gegeben, wenn die Angabe einer Wellenlänge neben der Energiemenge zur Kennzeichnung ausreicht. Dies ist der Fall beim homogenen Licht. Wie schon erwähnt, senden glühende Gase eine geringe Anzahl von Schwingungen bestimmter Wellenlänge aus, die durch Filter (farbige Gläser oder Gelatineblättchen) oder auf anderem Wege ausgesondert werden können. Aber auch aus dem weißen Lichte lassen sich näherungsweise mittelst geeigneter Vorrichtungen monochromatische Lichtwellen aussondern. Ob nun diese Schwingungen im weißen Lichte wirklich schon enthalten sind, oder ob sie erst durch die Wirkung der Apparate erzeugt werden, ist für die vorliegenden Überlegungen ohne

Belang. Im Teer sind die aus ihm herstellbaren Farbstoffe auch nicht vorhanden: erst durch geeignete Verknüpfung der Grundbestandteile, durch geeignete Behandlung ist die Herstellung möglich. Durch die Ausführungen von Gouy, Rayleigh, Schuster, Laue und Plank ist wahrscheinlich gemacht, daß das „Weiß" der üblichen Lichtquellen eine Folge unregelmäßiger Impulse oder Störungen im Lichtäther ist und daß die mehr oder weniger homogenen Strahlungen verschiedenen Graden der Regelmäßigkeit der Ätherschwingungen entsprechen. Eine Strahlung, die nur eine Wellenlänge enthält, ist demnach als einfachste Form anzusprechen, und hat nur in diesem Sinne Anspruch auf die Bezeichnung „einfarbig". Daß ihr eine einfache Empfindung entspricht, ist damit noch nicht gesagt.

Zerlegt man die Gesamtstrahlung eines weißleuchtenden festen Körpers durch ein Prisma in der Weise, wie sie in Bild 26 schematisch wiedergegeben ist, so kommt von der gesamten Energie, die im Spektrum in eine fortlaufende Reihe von homogenen Schwingungen zerlegt ist, nur ein kleiner Teil im Auge zur Wirkung und zwar die Wellenlängen zwischen 760 $\mu\mu$ und 400 $\mu\mu$. Die längeren Wärmewellen, die meist den größten Teil aller Energie enthalten, werden ebensowenig als Licht empfunden, wie die kurzen ultravioletten (chemisch wirksamen) Strahlen. Jeder der sichtbaren Wellenlängen entspricht eine bestimmte Farbenempfindung. Bei dem allmählichen Übergang der einzelnen Farben sind Grenzen der Farbtöne nicht genau wiederzugeben, doch können in Annäherung die Grenzen, wie folgt festgelegt werden:

760—660	$\mu\mu$	Rot
660—580	„	Orange
580—560	„	Gelb
560—510	„	Grün
510—490	„	Blaugrün
485—470	„	Blau
470—400	„	Violett

Diese Empfindungen normaler Augen treten nur für mittlere Intensität auf. Bei zunehmender Helligkeit gehen alle Farben in Weiß oder Gelb über, mit abnehmender Helligkeit ändert sich der Farbton ebenfalls. Bei den geringsten Helligkeitsstufen verschwinden die Farben überhaupt und das Dunkelspektrum des indirekten Sehens tritt auf (S. 38). In Analogie mit den schon frühzeitig begründeten Gesetzen der musikalischen Harmonie versuchte man auch, die durch das Spektrum des weißen Lichtes ausgelösten Farbenempfindungen einzuteilen. Abgesehen davon, daß die Spektralfarben gar nicht das ganze Gebiet der Farbenempfindungen umfassen, ist eine solche Einteilung auch deshalb verwerflich, weil das Auge selbst bei großer Übung gar nicht imstande ist, aus dem Farben-

eindruck mit Sicherheit zu schließen, ob eine homogene Welle oder ein Gemisch von solchen die Farbenempfindung erzeugt, während das geübte Ohr aus jedem Tongemisch die einfachen Grundtöne heraushört. Außerdem hängt der Farbeneindruck von der Intensität des Lichtes ab und wird beeinflußt durch die von andersgearteter Strahlung hervorgerufene Farbenempfindung benachbarter Netzhautelemente. Wir können also von diesen Versuchen, die Verknüpfung der Empfindungen zahlenmäßig darzustellen, absehen.

Neue Arten von Farbenempfindungen entstehen, wenn man auf das gleiche Netzhautelement gleichzeitig zwei oder mehrere homogene Strahlungen einwirken läßt. Neben den bereits im Spektrum enthaltenen Farbtönen treten bei diesen Mischungen Purpur und Weiß als neue Farbtöne auf. Zu jeder Wellenlänge des Spektrums mit Ausnahme des Bereichs von 500—560 μ läßt sich eine zweite finden, die mit ihr in bestimmtem Verhältnisse gemischt, Weiß ergibt. Wird eine Wellenlänge zwischen 500 und 560 $\mu\mu$ als eine der erregenden Strahlungen gewählt, so müssen zwei Wellenlängen hinzugefügt werden, deren Gemisch eine Purpurfarbe ergibt. Die sich zu Weiß ergänzenden komplementären Farbenpaare sind nach Helmholtz:

Farbe	Wellenlänge	Komplementärfarbe	Wellenlänge	Verhältnis d. Wellenlängen
Rot	656,2 $\mu\mu$	Grünblau	492,1 $\mu\mu$	1,334
Orange	607,7 „	Blau	489,7 „	1,240
Goldgelb	585,3 „	Blau	485,4 „	1,206
Goldgelb	573,9 „	Blau	482,1 „	1,190
Gelb	567,1 „	Indigblau	464,5 „	1,221
Gelb	564,4 „	Indigblau	461,8 „	1,222
Grüngelb	563,6 „	Violett	von 433 „ ab	1,301

Für das Verhältnis der Wellenlängen ergibt sich demnach kein konstanter Wert. Aus Bild 39, in welchem die Zahlen der vorstehenden Tabelle graphisch dargestellt sind, ist aber zu entnehmen, daß ein hyperbelähnliches Gesetz bestehen muß. Die von verschiedenen Beobachtern[1]) mitgeteilten Zahlen für die Wellenlängen der Komplementärfarben, deren Abweichungen voneinander wahrscheinlich auf individuelle Eigentümlichkeiten zurückzuführen sind, lassen sich in der von Grünberg aufgestellten Beziehung

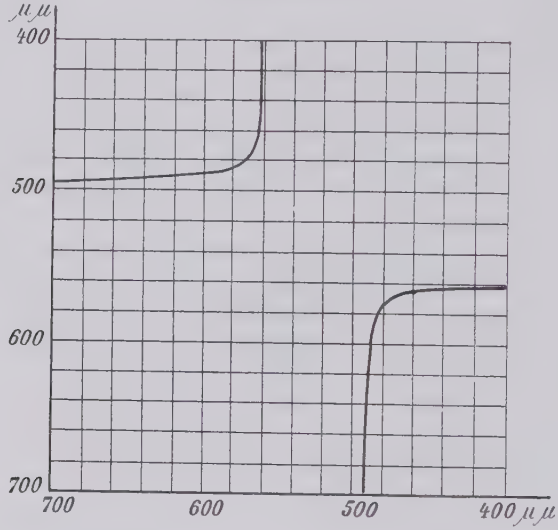
$$(\lambda - 559)\ (498 - \lambda') = 424$$

zusammenfassen, wobei λ die größere, λ' die kleinere Wellenlänge in Millionstel Millimetern bezeichnet. Während also bei gleichzeitiger

[1]) v. Kries, Frey, König und Dieterici.

Einwirkung von Komplementärfarben der Farbeneindruck völlig verschwindet, ist dies bei Mischung anderer Farbenpaare nicht der Fall. Je näher die gleichzeitig auf die Netzhaut wirkenden Wellenlängen einander liegen, desto lebhafter ist der Farbeneindruck, je mehr sich die Wellenlängen denen der Komplementärfarben nähern, um so mehr überwiegt der Eindruck des Weiß. Für die Lebhaftigkeit des Farbeneindrucks wird auch die Bezeichnung Sättigungsgrad gebraucht; der höchste Grad der Sättigung (100) entspricht dem lebhaftesten Farbeneindruck, der Sättigungsgrad Null der Abwesenheit jedes Farbeneindrucks, dem reinen Weiß. Man kann also sagen, daß der bei additiver Mischung von

Bild 39.



Komplementärfarben entstehende Lichteindruck den Sättigungsgrad Null aufweist. Es zeigt sich aber, daß den reinen Spektralfarben noch nicht der höchste Sättigungsgrad zukommt und aus den oben gemachten Bemerkungen folgt auch, daß der Sättigungsgrad von der Intensität der Strahlung abhängig ist. Um irgend einen Lichteindruck, der durch gleichzeitige Einwirkung zweier oder mehrerer Farben entsteht, zu kennzeichnen, ist also außer Angabe der Farbe (Qualität) noch Angabe des Sättigungsgrades und der Helligkeit erforderlich, wobei die Maßzahl der Helligkeit noch auf verschiedene Weise definiert werden kann (S. 63).

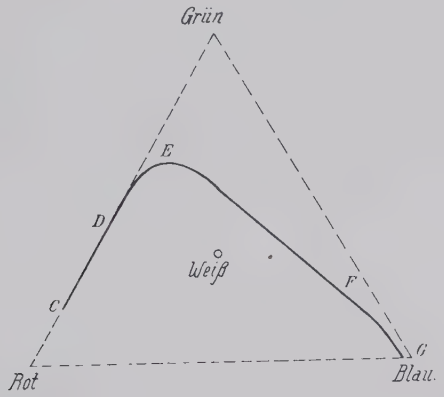
Bei gleichzeitiger Einwirkung von mehr als drei verschiedenen Strahlenarten kommen neue Farbenempfindungen nicht zustande. Mit zunehmender Zahl der Komponenten wird der Sättigungsgrad immer geringer, um schließlich bei gleichzeitiger Einwirkung aller im Spektrum auftretenden sichtbaren Strahlungen den Sättigungsgrad Null zu ergeben.

Man kann den Farbeneindruck, den ein beliebiges Gemisch von Wellenlängen hervorbringt, auch erzeugen durch Mischung von Weiß mit einer bestimmten Spektralfarbe oder Purpur. Da Weiß selber wieder durch zwei im passenden Verhältnis gemischte Spektralfarben erzeugt werden kann, so ergibt sich der Satz, daß eine Farbenempfindung 1 von der Intensität i_1 gleichwertig ist der Empfindung, die durch höchstens drei Strahlungsarten, die Wellenlängen λ_1, λ_2, λ_3 von der Intensität i_1, i_2, i_3 erzeugt wird, oder

$$i_e \,.\, 1 = i_1 \lambda_1 + i_2 \lambda_2 + i_3 \lambda_3.$$

Newton war der erste, der die Gesetze der Farbenmischung studierte und Grassmann hat eine weitere Entwicklung gegeben. Wie auch die Intensität der Farbeindrücke definiert werden mag, stets wird sich

Bild 40.



für die reinen Farben eine geschlossene Linie ergeben, die von Rot über Gelb, Grün, Blau, Violett und Purpur nach Rot zurückkehrt. Setzt man voraus, daß gleiche Quantitäten von Komplementärfarben zusammenwirkend Weiß ergeben, so wird sich die Linie der reinen Farben als Kreis darstellen. Legt man dagegen als Maß der Quantität die photometrischen Helligkeiten zugrunde, so erhält man für die Kurve der einfachen Farben eine Form, wie sie in Bild 40 gegeben ist. Die spektralen Farben würden auf der ausgezogenen Linie zu suchen sein, wobei C, D, E, F und G' die den gleichbenannten Frauenhöferschen Linien, also den Wellenlängen 656, 589, 527, 486, 431 $\mu\mu$ entsprechen. Zieht man durch den mit Weiß bezeichneten Punkt eine Gerade, so geben die Abschnitte die Intensitäten monochromatischer Strahlung, die vereinigt Weiß ergeben. Alle übrigen Farbenmischungen ergeben sich in gleicher Weise. Die Farben des Sättigungsgrades 100 liegen in dieser von A. König angegebenen Farbentafel in den rechts oberhalb EF gelegenen Seiten des Farbendreieckes.

§ 30. Die Körperfarben.

Für Körperfarben liegen nicht mehr die einfachen Verhältnisse vor, wie für Spektralfarben. Normalerweise trifft auf die Oberfläche eines Körpers das als Gemisch aller sichtbaren Wellenlängen zu betrachtende „Weiß“ auf und es wird nicht nur eine geringe Zahl einzelner Schwingungen zurückgeworfen, sondern stets ein mehr oder weniger großer Bruchteil aller im weißen Licht vorhandenen Wellenlängen. Werden alle Wellenlängen vollständig reflektiert und zwar unter Zerstreuung nach allen Richtungen, so wird der Körper selbst Weiß genannt; wird von allen Schwingungen ein gleicher Bruchteil zurückgeworfen, so wird der Körper Grau genannt. Wird die gesamte auffallende Strahlung absorbiert, so nennt man den Körper oder besser seine Oberfläche Schwarz. Weder ein reines Weiß noch ein vollkommenes Schwarz ist als Körperfarbe zu erzielen. Das der Definition am nächsten kommende Schwarz läßt sich dann herstellen, wenn man einen innen geschwärzten Hohlraum (Pappkasten) mit einer kleinen Öffnung versieht. Alle in diese Öffnung einfallenden Strahlen werden durch mehrfache Reflexion an den Wänden praktisch vollständig vernichtet, so daß die Öffnung kein Licht mehr austreten läßt und rein schwarz erscheint. Gegenüber diesem Schwarz erscheint auch guter schwarzer Samt noch deutlich grau.

Während also bei den Körperfarben eine kontinuierliche Reihe von Weiß nach Schwarz (mit Ausnahme der Grenzwerte) sich objektiv herstellen läßt, dem Schwarz also auch noch eine zahlenmäßige Kennzeichnung seiner Eigenschaften zukommt, würde bei reinen Spektralfarben Schwarz nur dadurch zu definieren sein, daß kein Licht mehr ins Auge gelangt. Die Einführung des Schwarz als selbständiger Farbe, das bei Helmholtz nur als Farbenempfindung eingeführt wird, aber für die Ableitung der Mischfarben nicht benutzt wird, ist, obwohl von Hering schon angedeutet, erst durch Ostwald erfolgt, wodurch für die Reihe der grauen Farben eine einfache Kennzeichnung in der Weise erreicht wird, daß für jede Farbe ihr Weißgehalt w und ihr Schwarzgehalt s angegeben wird. Dabei gilt

$$s + w = 100.$$

Ist das Reflexionsvermögen nicht für alle Wellenlängen das gleiche, so tritt ein gewisser Farbton auf, der um so lebhafter ist, je vollkommener die Reflexion für einen begrenzten Wellenlängenbereich ist. Ostwald zeigt, daß für jede Körperfarbe als hinreichend drei Bestimmungsstücke zu betrachten sind, nämlich der Farbton, der Gehalt an Weiß und der Gehalt an Schwarz; bezeichnet r den Farbgehalt, so ist demnach

$$r + s + w = 100.$$

Die Gesamtheit aller Farben ist danach dreidimensional und Ostwald stellt sie in einem Doppelkegel dar, dessen Drehungsachse die grauen (unbunten) Farbtöne enthält, während auf dem Grundkreis die in sich geschlossene Reihe der reinen Farben angeordnet ist. Auf jeder Verbindungslinie eines Achsenpunktes mit einem Punkte des Grundkreises liegen alle Farben, die durch die verschiedenen Mischungen des durch den Achsenpunkt bezeichneten Grau mit der reinen Farbe gegeben sind. Der eine Kegelmantel enthält daher die Gesamtheit der Mischungen mit Weiß (hellklare Farben), der andere die Mischungen mit Schwarz (dunkelklare Farben). Im Innern des Doppelkegels sind die Mischungen mit Grau (trübe Farben) zu suchen.

Die an sich stetig verlaufende Reihe sowohl der bunten als auch der grauen Farbtöne mit den ebenfalls allmählich übergehenden Mischungen kann nur dadurch eine Einteilung erhalten, daß die Schwellenwerte, d. h. die gerade noch unterscheidbaren Stufen zugrunde gelegt werden. Da nun die Helligkeitsempfindung nicht mit Zumischung gleicher Mengen Weiß in gleichen Stufen ansteigt, so werden diese nicht durch gleiche Differenzen von Weiß oder Schwarz in der Mischungsgleichung $s + w = 100$ gegeben sein, sondern es ergibt sich eine Reihe, die durch die Weißzahlen

100 63 40 25 16 10 06 04

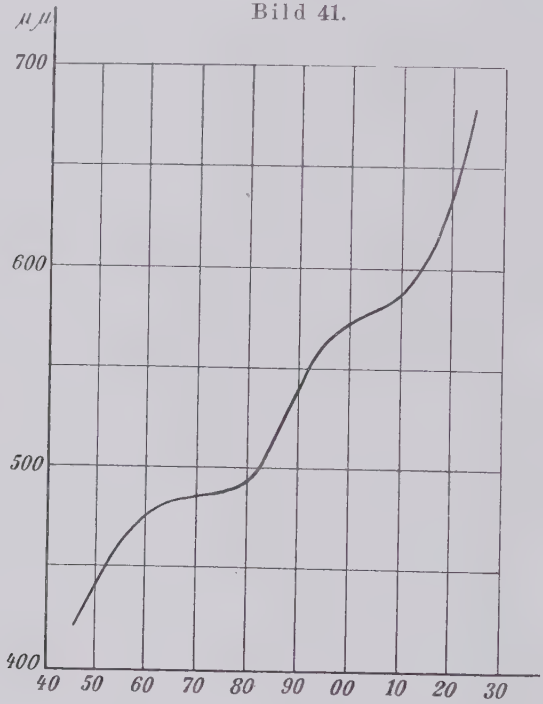
dargestellt wird, wobei jedoch noch zwischen jeder Stufe eine größere Anzahl wohl unterscheidbarer kleinerer Stufen eingeschaltet werden kann. In ähnlicher Weise ergibt sich auch für die in sich geschlossene Reihe der reinen Farben eine Stufenfolge von erkennbaren Farbenunterschieden. Ostwald gibt insgesamt etwa 100 Stufen an; für den praktischen Gebrauch reichen jedoch 25 Stufen vollständig aus. Im Vergleich mit den Spektralfarben ergeben sich dann nach Ostwald die gleichabständigen Farbtöne

Farbton	Wellenlänge	Farbton	Wellenlänge
00	572,1	50	440
04	577,7	54	464
08	582,0	58	475,4
13	593	63	480,6
17	616	67	483,1
21	641	71	484,8
25	700	75	487,1
29	—	79	491,6
33	—	83	500,4
38	—	88	530,0
42	—	92	555,3
46	423	96	566,3

Purpur

Aus der Tabelle ist zu entnehmen, deutlicher jedoch noch aus Bild 41, daß im Spektrum Gebiete vorhanden sind, innerhalb deren mit der Wellenlänge nur eine geringe Änderung des Farbtones eintritt, während in den Zwischenzonen bei geringster Wellenlängendifferenz große Farbenänderung vorhanden ist. Starke Änderungen des Farbtones treten auf bei etwa 485 $\mu\mu$ und 580 $\mu\mu$, kaum merkbare hingegen bei 450 $\mu\mu$, 530 $\mu\mu$ und oberhalb 600 $\mu\mu$.

Bild 41.



Es läßt sich somit, obgleich sich die spektrale Zusammensetzung der Körperfarben durch einfache Gemische von wenigen homogenen Schwingungen nicht darstellen läßt, doch als Vergleichsmaßstab die Wellenlänge heranziehen. Die reinsten Körperfarben enthalten nach Ostwalds Lehre vom Farbengehalt stets ein ganzes Spektralgebiet. Reine gelbe Körperfarben reflektieren fast vollständig das ganze Gebiet von Rot bis Grün, vom Blaugrün ab hingegen wird alles absorbiert. Eine erschöpfende Wiedergabe der umfangreichen Arbeit Ostwalds ist infolge des beschränkten Raumes nicht möglich, doch sei noch auf den Erfolg hingewiesen, daß auf Grund seiner Versuche eine zahlenmäßige Bestimmung jeder Farbe möglich ist. Ostwald gibt diese durch drei Zahlen, deren erste den Farbton, deren zweite den Weißgehalt und deren letzte den Schwarzgehalt bezeichnet. Demnach ist

23 . 00 . 56	Rot	mit	0 %	Weiß	und	56 %	Schwarz
75 . 60 . 00	Blaugrün	„	60 %	„	„	0 %	„
xx . 24 . 76	Grau	„	24 %	„	„	76 %	„
56 . 20 . 40	Blau	„	20 %	„	„	40 %	„

Bei den grauen Farbtönen bezeichnet xx das Fehlen einer Beimischung von Farbe. Selbst bestimmte Hinweisungen für Farbenharmonien gibt Ostwald bereits in seinen Veröffentlichungen. Wenn auch von Seiten der Künstler teilweise noch der Wert dieser Ableitungen bestritten wird, manchmal sogar in recht scharfen Formen (Horn, München), so wird doch vielfach schon die Ostwaldsche Bestimmungsweise der Farben praktisch benutzt (Deutscher Werkbund) und die neuerdings erfolgte Errichtung einer sächsischen Landesstelle für Farbkunde zeigt, daß für eine genaue Kennzeichnung der Farben ein Bedürfnis in Kreisen der Praxis vorliegt.

§ 31. Die Theorien des Farbensehens.

Young hat (1807) als erster versucht, die Mannigfaltigkeit der Farbenempfindungen auf einfache Funktionen der Sehnerven zurückzuführen. Seine auf die Annahme des Vorhandenseins dreier Arten von Nervenfasern sich gründende Theorie ist von Helmholtz weiter ausgebaut und kann auch heute noch zur Erklärung einer großen Anzahl von Tatsachen herangezogen werden, wenn auch neuere Beobachtungen zu Änderungen und Ergänzungen der Annahmen zwingen.

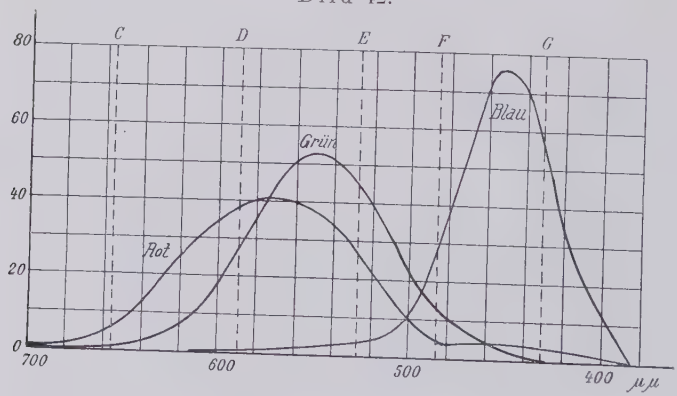
Ausgehend von der Tatsache, daß jede Farbenempfindung auf drei zunächst noch beliebig zu wählende Grundfarben zurückgeführt werden kann, wird angenommen, daß drei Nervengruppen für die Grundempfindungen des Rot, Grün und Violett im Auge vorhanden sind, die je nach der Stärke ihrer gleichzeitig auftretenden Reizung die Empfindungen des Weiß oder der Mischfarben vermitteln. Schwarz entspricht dem Ruhezustande. Doch mag sofort erwähnt sein, daß ein Nachweis der verschiedenen Nervengruppen noch nicht erfolgt ist, obwohl das Auftreten farbiger Ölkügelchen in der Netzhaut der Vögel wenigstens andeutungsweise als Stütze der von Helmholtz entwickelten Hypothese gelten kann. Schultze wies nach, daß die Außenglieder der Zapfen ein System paralleler Plättchen aufweisen, deren Abstand der Wellenlänge des Lichtes vergleichbar ist. Ob diese die Analyse des auftreffenden Lichtes bewirken oder ob eine Zersetzung lichtempfindlicher Substanzen in Frage kommt, sei dahingestellt. Sicher ist nur, daß die homogenen Strahlungen mindestens zwei Elementarempfindungen erregen, daß also die einfachsten Farbenempfindungen sehr wohl zu unterscheiden sind von den im Spektrum dargebotenen Farbeneindrücken. Immerhin kann vergleichsweise der Eindruck der Spektralfarben zur Kennzeichnung der

Grundempfindungen benutzt werden, zumal an den Enden des Spektrums der Reiz vorwiegend nur auf eine Grundempfindung wirkt. Gemäß den Untersuchungen verschiedener Forscher sind diese Grundempfindungen

Beobachter	Rot	Grün	Violett bzw. Blau
Young	Anfang des Spektrums	Mitte des Spektrums	Ende des Spektrums
Helmholtz	Karmin (nicht spektral)	560 — 540 $\mu\mu$	Ultramarinblau
Maxwell	630 $\mu\mu$	530 $\mu\mu$	457 $\mu\mu$
König und Dieterici	Rot, außerhalb des Spektrums (etwa 675 $\mu\mu$)	505 $\mu\mu$	470 $\mu\mu$
S. Exner	Äußerstes Rot	520 $\mu\mu$	etwa 470 $\mu\mu$
F. Exner	Komplementärfarbe zu 494 $\mu\mu$	508 $\mu\mu$	475 $\mu\mu$
V. Grünberg . . .	665 $\mu\mu$	506 $\mu\mu$	482 $\mu\mu$
Allen	Zwischen Ende des Spektrums und 660 $\mu\mu$	570 — 470 $\mu\mu$	420 $\mu\mu$ bis Ende des Spektrums

Eine Bestimmung der Grundempfindungen und ihre Abhängigkeit von der Wellenlänge, wie sie nach König und Dieterici in Bild 42 wiedergegeben sind, ist dadurch möglich, daß man die Änderung des

Bild 42.

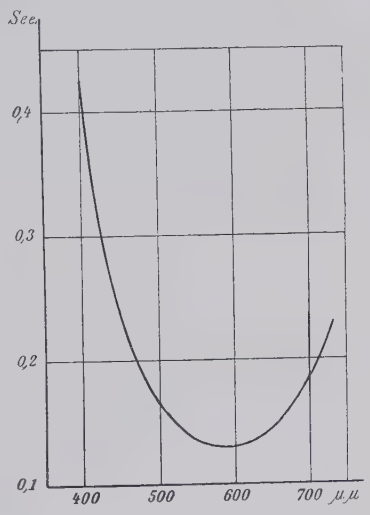


Farbentones für abnehmende Intensität bei einer bestimmten Wellenlänge beobachtet. Die Empfindung, die am schwächsten erregt wird, wird zuerst unter die Reizschwelle sinken; es muß also der Farbton sich in ganz

bestimmtem Sinne ändern. Wählt man die Wellenlänge 640 $\mu\mu$ und vermindert die Intensität, so wird nach Bild 42 die Grünempfindung zuerst ausschalten, also der Farbenton sich nach Rot hin verändern, bei 520 $\mu\mu$ wird zuerst das an sich schwache Blau aussetzen, der Farbton also etwas nach Rot sich verschieben und schließlich mit dem Ausschalten der Rotempfindung in Grün übergehen. Dieses von Bezold und Brücke angegebene Verfahren gibt nicht genaue Werte. Die im Bilde 42 dargestellten Kurven der Elementarempfindungen sind auf dem Wege direkter Auswertung des Spektrums mit Hilfe dreier einfachen Spektralfarben gewonnen.

Auf anderem Wege haben S. Exner und F. Allen die Empfindlichkeitskurven festgestellt. Man ermüdet das Auge für eine bestimmte Farbe und ermittelt die nun vorhandene Empfindlichkeit für die Spektralfarben. Nach längerer Einwirkung der Wellenlänge 460 $\mu\mu$ erhielt Allen die in Bild 43 angegegebenen kritischen Flickerzeiten, die von der nach Ermüdung durch normales Tageslicht erhaltenen Abweichungen aufweist. Solange bei der Ermüdung nur eine Grundempfindung erregt wird, zeigt sich nur eine Erhebung über die für weißes Licht erhaltene Kurve, für Erregung zweier Grundempfindungen zwei Erhebungen. Die Übergangsstellen 660, 577, 470 und 420 $\mu\mu$ würden also die Gebiete einfacher Empfindungen gegen die der gemischten Empfindungen abgrenzen, wie es in Bild 44 angedeutet ist. Neuere Arbeiten von Barton und Browing und von Houstoun geben neben einem mechanischen Modell der Empfindungsübertragung auf Grund der modifizierten Young-Helmholtzschen Theorie den Weg zu einer Ausschaltung der individuell vorhandenen Helligkeitsempfindung durch Einführung der Energiewerte.

Bild 43.



Auf anderen Voraussetzungen ist die Theorie von Hering aufgebaut. Dieser nimmt drei Sehsubstanzen an, durch deren Veränderungen die Grundempfindungen ausgelöst werden, und zwar wird beim Aufbau (Assimilation) eine Empfindung erregt, die zu der beim Abbau (Dissimilation) auftretenden komplementär ist. Während die eine Substanz nur zur Auslösung der Hell- und Dunkelempfindung dient, vermitteln die beiden anderen vier Grundfarbenwahrnehmungen, und zwar tritt auf

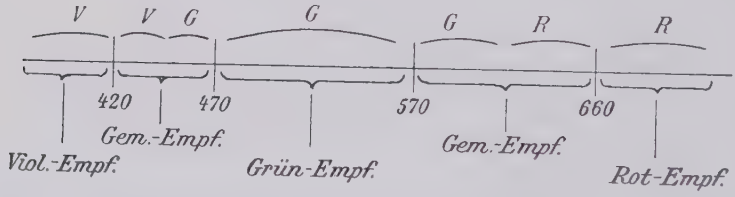
bei Dissimilation	bei Assimilation
Weiß	Schwarz
Rot	Grün
Gelb	Blau,

wobei Rot + Grün und Gelb + Blau bei Ausgleich der Assimilierungs- und Dissimilierungsprozesse Weiß ergeben, weil alle Spektralfarben auch auf die Schwarz-Weiß-Substanz wirken. Sie erscheinen daher auch stets ungesättigt. Das Auftreten der Komplementärfarben ist daher bei Hering zwangloser erklärt als bei Helmholtz.

Die den Urempfindungen entsprechenden Wellenlängen und Farben sind nach Hering Purpur, 575 $\mu\mu$, 495 $\mu\mu$ und 472 $\mu\mu$ während von J. W. Baird (1905) die nur geringfügig veränderten Werte 570, 490 und 460 $\mu\mu$ neben Purpur angegeben werden.

Die neuerdings erschienenen Schriften Picklers, der sich gegen die Heringsche Theorie der Gegenfarben wendet und eine hypothesen-

Bild 44.



freie Theorie der Gegenfarben aufzustellen versucht, leiden darunter, daß zu wenig Rücksicht auf die objektiv und zahlenmäßig darstellbaren Zusammenhänge zwischen Reiz und Empfindung genommen wird und daß, wenigstens für die physikalisch-physiologische Forschung, positive Ergebnisse nicht zu verzeichnen sind. Die Hypothese der Anpassung stellt, freilich in etwas abweichender Art, eine Verknüpfung Helmholtzscher empiristischer Anschauungsweise mit philosophisch-psychologischen Gedankengängen dar (§ 46).

Zur Prüfung der Theorien des Farbensinnes besonders geeignet sind die Fälle, in denen eine mangelhafte Farbenwahrnehmung vorliegt. Der häufigst vorkommende Fall der Farbenblindheit (etwa 4 % bei Männern) ist die Rot-Grün-Blindheit, bei der nur noch Blau und Gelb empfunden wird, Rot und Grün bestimmter Art hingegen verwechselt wird. Seltener ist der Fall der Gelb-Blau-Blindheit. Für diese beiden sowohl, wie für die nur ausnahmsweise beobachtete totale Farbenblindheit gibt die Helmholtzsche Annahme eine sehr einfache Erklärung: Je nach der ausfallenden Grundempfindung lassen sich alle Erscheinungen auf die Wirkung der noch übrigbleibenden beiden Grundempfindungen zurückführen; bei

totaler Farbenblindheit fallen alle Farbenempfindungen aus und die verbleibende Helligkeitswahrnehmung ist durch die Stäbchenkurve (Bild 27) gegeben. Vorübergehende partielle Farbenblindheit kann bei Vergiftungen auftreten. Santoningenuß erzeugt eine vorübergehende Violettblindheit.

Die Prüfung auf Farbenwahrnehmungsvermögen, der anfänglich die Auswahl verschieden gefärbter Wollproben von Holmgreen zugrunde gelegt wurde, wird entweder mit Hilfe der Nagelschen Tafeln, die ein System physiologisch gleich heller Punkte in verschiedenen Färbungen enthalten oder besser mit den Stillingschen Tafeln ausgeführt. Am einwandfreiesten ist die Verwendung eines geeigneten Spektralapparates (Stillingsches Anomaloskop). Die von Cohn angegebenen Florkontrastproben (S. 81) werden von Oloff als unzweckmäßig bezeichnet.

Bei sehr geringer Feldgröße verschwinden die Farbeneindrücke, wenn nicht die Helligkeit hinreichend ist, doch hängt bei bestimmter Helligkeit die Feldgröße von der Farbe (Wellenlänge) selbst ab. Je verschiedener die Helligkeit des Grundes und des farbigen Feldes ist, desto eher verschwindet die Farbe. Diese Erscheinungen sind jedoch nicht identisch mit dem Purkinjeschen Phänomen, da sie sich auch in der Netzhautgrube abspielen.

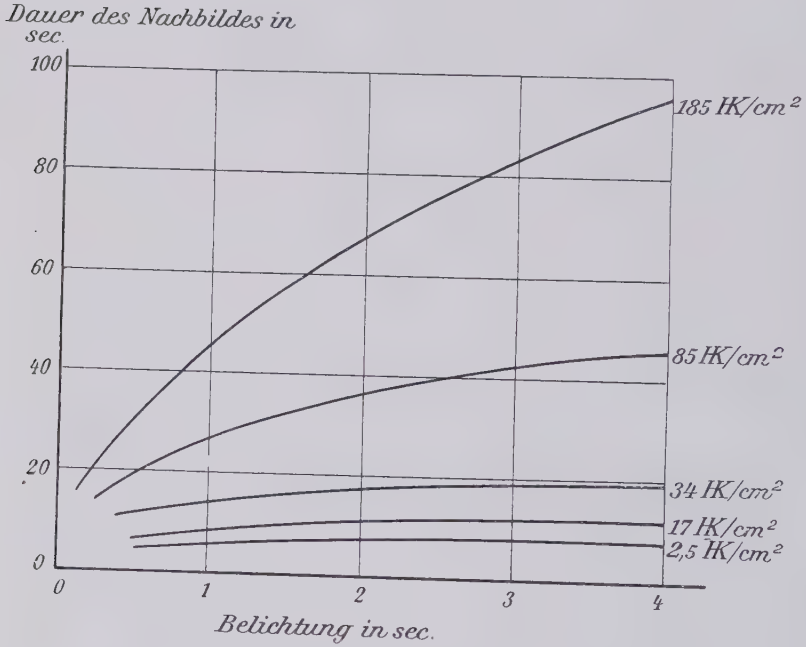
§ 32. Nachbilder und Kontrastfarben.

Die Einwirkung eines äußeren Reizes auf das Auge läßt nicht sofort die Empfindung in dem vollen, der Stärke des Reizes entsprechenden Ausmaß entstehen; entsprechend hört auch die Empfindung nicht im Augenblick des schwindenden Reizes auf, sondern klingt langsam ab und zwar ist die Dauer des Abklingens abhängig von der Dauer des Reizes und der Stärke desselben. Jede starke Lichtquelle, vor allem die Sonne, erzeugt diese verlöschenden Nachbilder. Lukiesh hat die Dauer des Nachbildes für eine Reihe von Lichtquellen verschiedener Flächenhelle angegeben (Bild 45). Trägt man die Belichtungszeit in Sekunden (Reizdauer) als Abszisse, die Dauer des Nachbildes in Sekunden als Ordinate auf, so zeigt sich, daß mit zunehmender Flächenhelle und Reizdauer die Dauer des Nachbildes stark anwächst; für geringe Flächenhelligkeiten $\left(2{,}5\ \frac{\mathrm{HK}}{\mathrm{cm}^2}\right)$ ist die Nachbilddauer freilich fast unabhängig von der Belichtungszeit. Ohne merkliche Dauer des Nachbildes sind alle Reize, die von Lichtquellen erzeugt werden, deren mittlere Flächenhelle kleiner als $0{,}75\ \frac{\mathrm{HK}}{\mathrm{cm}^2}$ ist. Derartige Lichtquellen blenden nicht. Die meisten gebräuchlichen Lampen weisen jedoch, ohne lichtstreuende Umhüllung, bedeutend stärkeren Glanz

auf. Die Flächenhelle einiger „nackten“ Lampen ist nach Monasch:

	Flächenhelle in $\frac{HK}{cm^2}$
Moorelicht	0,04—0,25
Kerze	0,6—0,7
Schnittbrenner	0,7
Petroleumbrenner	1,0—1,8
Gasglühlicht	3,7—6,7
Azetylen	6,0—9,0
Kohlenfadenlampe 3,1 W/HK	70—80
Metallfadenlampe 1,1 W/HK	170—180
Flammenbogen	600—1000
Reinkohlenlichtbogen	1800—8000

Bild 45.



Fast jede der modernen Lichtquellen überschreitet also die ohne Blendung zu ertragende Flächenhelle und deshalb sollten sie nur in lichtstreuenden Glocken Verwendung finden, da die Nachbilder, die bei direkter Einwirkung des starken Lichtes auf das Auge entstehen, nicht nur das Arbeiten stören, sondern gegebenenfalls sogar ernste und nachhaltige Störungen des Sehvermögens bewirken können.

Die Nachbilder können nun sowohl positiv als negativ sein. Positiv werden solche genannt, bei denen die hellen Teile des Objektes hell,

negativ solche, bei denen im Nachbild die hellen Teile des Objektes dunkel erscheinen. Positiv bleibt das Nachbild so lange, als seine Intensität größer ist, wie die Intensität der Empfindung, die durch neue Reize hervorgerufen wird. Schließt man nach Einwirken der Lichtquelle das Auge, so daß weitere Reize ausgeschlossen sind, so klingt das Nachbild als positives aus, wobei Helligkeitsunterschiede im Objekt noch nachträglich erkannt werden können, die bei unmittelbarer Betrachtung des Objektes wegen zu großer Helligkeit nicht wahrgenommen werden konnten, ähnlich, wie bei stark überbelichteten photographischen Platten durch Abschwächung noch Details in den Lichtern herausgeholt werden können. Blickt man aber, während das Nachbild noch andauert, gegen gleichmäßig beleuchtete Flächen, so verwandelt sich das positive Nachbild in ein negatives. Die ermüdeten Netzhautstellen, deren Ermüdungsgrad durch die Intensität des positiven Netzhautbildes gemessen werden könnte, werden die neu auftretenden Reize um so schwächer wahrnehmen, je ermüdeter sie sind. Daraus folgt, daß die Beleuchtung der Flächen um so stärker gewählt werden muß, je intensiver das Netzhautbild erscheint. Ebenso folgt auch, daß von größeren Objekten mit verschiedenen Helligkeitsabstufungen die hellsten Teile ein positives, die schwächer beleuchteten ein negatives Nachbild erzeugen können. Da die Nachbilder an die gereizten Stellen der Netzhaut gebunden sind und mit der Bewegung des Auges ihren Ort ändern, bieten sie ein gutes Mittel zum Studium der Augenbewegungen dar.

Bei genauerem Beobachten erkennt man nun, daß die Nachbilder während des Abklingens Farbenveränderungen aufweisen. Schon bei längerer Einwirkung weißen Lichtes zeigt sich nach Fechners Beobachtungen infolge der Ermüdung eine Färbung. Die Farbenfolge beim positiven Nachbilde eines weißen Lichtes ist gelb, blau, rotviolett, rot. Aus seinen, wie aus Plateaus Versuchen geht hervor, daß die Rotempfindung im positiven Nachbilde anfangs schneller abfällt, als die Grünempfindung.

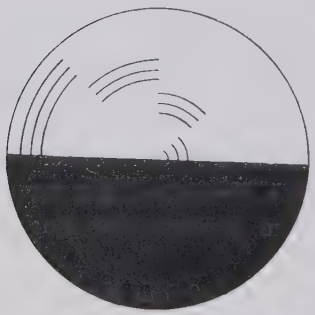
Ein Nachweis des farbigen Abklingen gelingt leicht durch Verwendung von rotierenden Scheiben, bei denen in konzentrischen Ringen in gesetzmäßiger Folge schwarz und weiß (oder auch bestimmte Farben) abwechseln, wie eine solche in Bild 46 wiedergegeben ist. Bei bestimmter Umdrehungsgeschwindigkeit zeigen derartige Scheiben eine deutliche Färbung.

Bei farbigen Objekten zeigt das Nachbild, wenn weißer oder grauer Grund fixiert wird die Komplementärfarbe, während auf schwarzem Grunde die gleiche Farbe als positives Nachbild auftritt. Sehr einfach läßt sich die Farbe des Nachbildes aus den Helmholtzschen Anschauungen über das Farbensehen ableiten. So wird beispielsweise durch Rot nur die rot-

empfindende Nervengruppe gereizt; spätere Einwirkung weißen Lichtes wird also wesentlich nur die grün und blau empfindenden Nervengruppen erregen und daher den Eindruck des Grün, der Komplementärfarbe von Rot hervorrufen. Läßt man nun auf das durch eine bestimmte Farbe teilweise ermüdete Auge die Komplementärfarbe fallen, so muß, da eine Nervengruppe durch die Ermüdung nahezu ausgeschaltet ist, die Komplementärfarbe eine gesättigtere Empfindung auslösen, als es bei unermüdetem Auge der Fall ist. Auf diese Weise läßt sich in der Tat nachweisen, daß die reinen Spektralfarben noch nicht den Eindruck größter Sättigung, d. h. reinster Farbenempfindung, hervorrufen.

Neben den zeitlichen Änderungen der Helligkeiten und Farben zeigen sich aber auch räumliche: jeder Teil eines Gesichtsfeldes erscheint neben einem helleren dunkler, neben einem dunkleren heller (Simultankontrast).

Bild 46.



Der Helligkeitskontrast tritt besonders dann auf, wenn zwischen zwei Felder die Helligkeit schnell, aber kontinuierlich sich ändert.

Bei photographischen Aufnahmen, die derartigen schnellen Wechsel der Schwärzung zeigen, (Spektralaufnahmen, Röntgenspektren) treten sogar vielfach helle oder dunkle Streifen auf; diese Mach-Windsche Täuschung ist bei der Beurteilung photographischer Aufnahmen daher stets zu berücksichtigen. Die Machschen Streifen treten dann auf, wenn, wie Walter nachgewiesen hat, das Gefälle der Schwärzungskurve Knickpunkte aufweist. Ob diese Erscheinungen auf eine gegenseitige Beeinflussung der Nervenbahnen zurückzuführen sind, ist noch nicht erwiesen.

Ähnliche, aber einfachere Erscheinungen zeigen sich auch, wenn schwarze Felder unmittelbar an weiße angrenzen. Diese unter dem Namen Irradiation zusammengefaßten Tatsachen haben gemeinsam, daß die hellen Felder vergrößert erscheinen, die dunklen kleiner. Helmholtz erklärt diese Verbreiterung heller Flächen unter Berücksichtigung der Beziehungen zwischen objektiver Helligkeit und Lichtempfindung durch die infolge der Zerstreuungskreise abfallende Helligkeit an den Grenzen der hellen Flächenteile. Die Zerstreuung infolge der Abbildungsfehler der Augenlinse bewirkt, vergrößert durch ungenaue Akkommodation, eine Ausbreitung der Helligkeit über die Grenzen der Flächenstücke hinaus, wodurch dunkle Stellen in der Nähe des Randes noch erleuchtet werden. Am deutlichsten zeigt sich diese Erscheinung, wenn man einen Draht vor eine helle Flamme bringt. Vor dieser erscheint der Draht merklich dünner und kann sogar ganz verschwinden.

Sind die anstoßenden Felder gefärbt, so beeinflussen sich die Farben der Felder gegenseitig. Eine kleine, graue Fläche auf farbigem Grunde erscheint deutlich gefärbt und zwar in der Komplementärfarbe des Grundes. Besonders stark tritt diese Färbung hervor, wenn man ein Blatt Seidenpapier oder halbdurchsichtigen Stoff über die Anordnung legt (Florkontrast). Es sei an dieser Stelle noch auf eine alte Erfahrung der Zeichner hingewiesen: Ist das Pauspapier so stark, daß die Zeichnung nur noch schwer sichtbar ist, so wird durch Bewegung des Papieres, auch wenn seine Dichte an allen Stellen gleich ist, eine bessere Erkennbarkeit bewirkt.

Besser noch als bei dem Florkontrast ist die Komplementärfarbe sichtbar, wenn man mit nahezu homogenem Licht eine weiße Fläche beleuchtet und den Schatten eines Stabes auf dieser entwirft. Wird dann durch eine zweite, weiße Lichtquelle von nahezu gleicher Helligkeit ein zweiter Schatten des Stabes auf der Fläche erzeugt, so erscheint die entsprechende Fläche des Schirmes, obwohl sie nur von homogenem Licht beleuchtet wird, doch in der Komplementärfarbe.

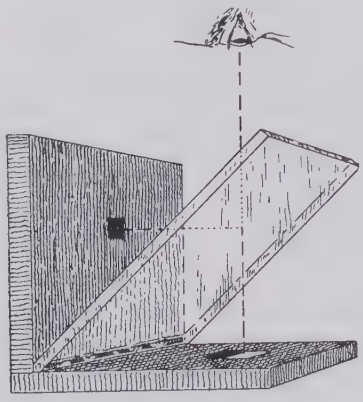
Die Erklärung des Auftretens der Kontrastfarben ist leicht, wenn man annimmt, daß das Auge sich bewegt. Es tritt dann für eine Farbe eine Ermüdung auf und damit, wie bei den Nachbildern, eine größere Aufnahmefähigkeit für die Komplementärfarbe; in diesem Falle ist also der Simultankontrast streng genommen nicht vorhanden, da er nur eine abgeänderte Form der Nachbilder darstellt, also auf zeitliche Folge der Eindrücke zurückgeführt werden kann. Für den Florkontrast wenigstens wird man aber diesen Vorgang der sukzessiven Wirkung annehmen müssen, weil Fixationspunkte kaum gegeben sind. Anders ist es für die beim Schattenkontrast vorhandene meist als reinen Simultankontrast anzusprechende Erscheinung. Sie tritt auch nur auf, wenn ein großer Teil des Gesichtsfeldes von einer bestimmten Farbe erfüllt wird. Eine vollkommen befriedigende Erklärung ist noch nicht gegeben worden; bei der Mannigfaltigkeit der Kontrasterscheinungen kann dies auch nicht wundernehmen, zumal auch zeitliche Änderungen vorhanden sind. Fixiert man ein kleines weißes Feld auf rotem Grund, so wird dieses manchmal grünlich, bei längerer Betrachtungsdauer aber immer rötlicher erscheinen.

Ein einfacher Apparat zur Betrachtung der Kontrastfarben ist von Ragona Scina angegeben worden (Bild 47). Sind die horizontal und vertikal stehenden Brettchen weiß und befindet sich zwischen ihnen eine unter 45° geneigte Glasplatte, so gelangt, wenn man von oben auf die Glasplatte blickt, ein Gemisch von gespiegeltem weißen und durchgelassenem farbigen Licht ins Auge, bis auf die Stellen, wo die Bilder der schwarzen Flecke liegen. Dort, wo das Spiegelbild des auf der vertikalen Fläche liegenden schwarzen Fleckes liegt, wird nur durch die Platte

gegangenes, gefärbtes Licht wirken. Das Bild des auf der horizontalen Fläche liegenden schwarzen Fleckes ist nur von weißem, höchstens durch mehrfache Reflexionen im Innern der Platte schwach gefärbten Lichtes erfüllt. Dennoch erscheint dieses deutlich komplementär gefärbt.

In der Malerei sind diese Erscheinungen, die nach Größe der farbigen Bilder, Helligkeit und Farbton mannigfachen Änderungen unterliegen können, schon seit langem bekannt. Zweifellos kann die Sättigung der Farben durch Kontrastwirkung erhöht werden und es ist nichts als ein Ausdruck der eben geschilderten Gesetzmäßigkeiten, wenn schon Leonardo da Vinci sagt, daß unter allen Farben von gleicher Vollkommenheit jene die schönsten sind, welche neben den entgegengesetzten stehen, also weiß neben schwarz, blau neben gelb, rot neben grün. Die Pointillisten benutzen ebenfalls die Kontrastwirkung, um durch nebeneinander gesetzte kleine Flecken stark verschiedenen Farbtones die Sättigung der Farbe zu erhöhen, gleichzeitig aber wird bei ihnen die Bewegung der Luft, das Flimmern des Wassers durch die Wechselwirkung der einzelnen Farben äußerst lebhaft wiedergegeben.

Bild 47.



§ 33. Die Photographie in natürlichen Farben.

Fast gleichzeitig mit der Erfindung des Verfahrens, das durch optische Vorrichtungen erzeugte Bild durch geeignete chemische Verfahren zu fixieren, tauchte der Gedanke auf, dieses Bild in natürlichen Farben wiederzugeben. Wohl ist die chemische Wirkung der homogenen Wellen nicht die gleiche — die photographische Platte ist besonders empfindlich für die kurzwelligen violetten und ultravioletten Strahlen — aber die Wirkung ist nur dem Grade nach verschieden: alle Wellenlängen bewirken nur eine Zerlegung der lichtempfindlichen Silbersalze. Selbst das einfache schwarzweiße Bild entspricht aber in seiner Helligkeitsverteilung noch nicht dem vom Auge wahrgenommenen Bild, weil das Auge besonders empfindlich für gelbgrünes Licht ist, während auf die Platte die kurzen Wellenlängen stärker wirken. Wie bekannt, läßt sich aber dieser Fehler teils durch Wahl entsprechender Filter, die das blaue Licht hinreichend schwächen, teils durch „Sensibilisierung“ der Platten vermeiden. Die

Sensibilisierung der Platten erfolgt durch Tränken der lichtempfindlichen Schicht mit geeigneten Farbstoffen, wodurch die Blauempfindlichkeit zugunsten der Rotempfindlichkeit vermindert wird.

Schon frühzeitig (1850) wurde gefunden, daß Chlorsilber, unter geeigneten Bedingungen auf eine Metallplatte gebracht, sich entsprechend der auffallenden Wellenlänge färbte, doch gelang es nicht, diese Farben zu fixieren. Wenn auch Lippmann gezeigt hat, daß diese „Interferenzbilder" festgehalten werden können, so ist es doch zu einer praktischen Anwendung des theoretisch wichtigen Verfahrens in nennenswertem Maßstabe nicht gekommen. Wie die Farben eines dünnen Seifenhäutchen oder einer Ölschicht auf Wasser von der Dicke der Schicht abhängig sind, so sind bei diesem Verfahren die Farben abhängig von dem Abstand der in der photographischen Schicht entstehenden Silberschichten.

Praktisch verwendet sind im wesentlichen nur diejenigen Verfahren, die auf der Tatsache beruhen, daß alle Farben durch die Wirkung von drei Grundfarben erzeugt werden können, wobei sowohl die additive wie die subtraktive Farbenmischung Verwendung gefunden hat. Wählt man drei Farbfilter, die je einen Teil des Spektrums durchlassen, der den Empfindungsgrenzen je einer Nervengruppe des Auges entspricht, so erhält man, wenn mit jedem Filter eine Aufnahme auf entsprechend sensibilisierten Platten gemacht wird, für jede Farbe die gleiche Zerlegung objektiv, wie sie im Auge subjektiv erfolgt. Die in der Praxis verwendeten Filter die den Bereichen

Rot etwa 700—590 $\mu\mu$
Grün „ 585—490 $\mu\mu$
Violett „ 475—410 $\mu\mu$

entsprechen, geben nicht alle Spektralfarben wieder. Da aber alle Körperfarben ein mehr oder weniger großes Gebiet von verschiedenen Wellenlängen zurückwerfen, so ist eine einigermaßen ausreichende Wiedergabe von Körperfarben möglich. Besser ist es, sich den theoretischen Empfindungskurven (S. 74) anzupassen. Werden nun die Diapositive dieser Aufnahmen durch passend gefärbte Wiedergabefilter auf die gleiche Stelle eines weißen Schirmes projiziert, so entsteht durch Addition der drei Farbbilder ein Bild in den natürlichen Farben (Verfahren von Miethe). Nach den Untersuchungen von Donath sind jedoch Aufnahme- und Wiedergabefilter nicht identisch. Während die Aufnahmefilter den Empfindungskurven genügen müssen, sollen die Wiedergabefilter den Grundempfindungen rot (665 $\mu\mu$), grünblau (507 $\mu\mu$) und blauviolett (475 $\mu\mu$) entsprechen. Donath gibt die folgende Zusammenstellung für Aufnahme- und Wiedergabefilter:

A. Aufnahmefilter

Grundfarbe	Gebiet	Maximum der Durchlässigkeit	Farbe der Filter
Rot	700—520 $\mu\mu$	600 $\mu\mu$	Orange mit rötlichem Stich
Grün	625—490 $\mu\mu$	565 $\mu\mu$	Grün mit gelblichem Stich
Blau	510—400 $\mu\mu$	450 $\mu\mu$	Violett

B. Wiedergabefilter

Rot		665 $\mu\mu$	Tiefes Rot
Grün		507 $\mu\mu$	Grün mit bläulichem Stich
Blau		475 $\mu\mu$	Blau mit violettem Stich

Auf die theoretisch interessante Methode von Wood, der die Strahlenzerlegung durch Beugungsgitter benutzte, um farbige Photographien herzustellen, sei nur hingewiesen. Größere Bedeutung kommt dem Jolyschen Verfahren zu, das in der Praxis gute Ergebnisse gezeitigt hat, nachdem es den Brüdern Lumière gelungen war, den anfangs verwendeten Linienraster durch einen Punktraster zu ersetzen. Dieses Verfahren, welches nur einer Platte bedarf, geht von der Tatsache aus, daß ein enges Gitter, dessen Striche in den transparenten Farben rot, grün, violett wechseln, bei hinreichender Entfernung vom Auge den Gesamteindruck des Weiß hervorbringt, bei Abdeckung einer der Farben ihre Komplementärfarbe. Wird dieses Gitter vor der Schicht einer photographischen Platte angeordnet, so werden die roten Strahlen hinter den roten Strichen auf die Schicht einwirken, die grünen und violetten hingegen absorbiert werden. Man erhält also eine Zerlegung gemäß den Grundempfindungen auf einer Platte und es bedarf nur einer Umkehrung des negativen Bildes, um bei Durchsicht als Gesamtwirkung der drei Farbbilder eine Wiedergabe von natürlichen Farben zu erhalten. Bei den Lumièreplatten besteht der punktförmige Raster aus gefärbten Stärkekörnchen, die möglichst lückenlos, ohne sich zu überdecken auf die Platte aufgebracht sind. Die Zwischenräume sind durch einen schwarzen Farbstoff ausgefüllt. Über diese Filterschicht wird die lichtempfindliche Schicht aufgegossen und die Platte von der Glasseite unter Anwendung eines Filters, das zum Ausgleich der Plattenempfindlichkeit für Violett dient, belichtet. Durch ein besonderes Verfahren gelingt es, das Negativ in ein Positiv zu verwandeln und damit die Aufnahme ohne Trennung des Rasters von der Schicht zu erhalten. An eine Vervielfältigung kann aus dem Grunde nicht gedacht werden, weil es kaum gelingen dürfte, zwei vollkommen identische Punktraster herzustellen. Sind die Raster aber nicht identisch,

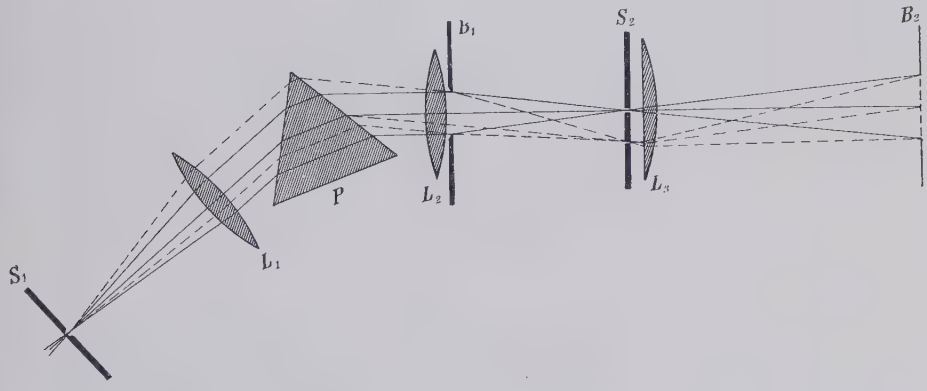
so muß, sobald ein Filterelement über einem anders gefärbten liegt, eine Vernichtung des Lichtes stattfinden, also bei Herstellung des positiven Bildes Schwärzung eintreten. Die Kopien müssen also äußerst lichtschwach werden, da schon bei den Lumière aufnahmen, selbst trotz der erforderlichen langen Belichtungszeiten, kein allzuhelles Bild sich ergibt.

Für die Reproduktion wird vorwiegend subtraktive Farbenmischung verwendet. Eine einfache Überlegung zeigt, daß in diesem Falle Filter und Druckfarbe etwa komplementär sein müssen. Für die Wahl der Farben ist maßgebend, ob die Bilder als Transparentbilder oder als Drucke hergestellt werden sollen. Es würde zuweit gehen, die verschiedenen Möglichkeiten wiederzugeben. Es sind sowohl rein photochemische Wiedergabeverfahren, wie auch mechanische Übertragungsmethoden benutzt worden (Pinatypie, Einstaubverfahren, Gummidruck, Rasterdruck).

§ 34. Farbenmisch- und Meßapparate.

Die einfachste Art der Mischung zweier Spektralfarben ist durch Überlagerung zweier Spektren gegeben. Bringt man in einem Schirm einen V-förmigen Spalt an, so werden die beiden gegeneinander geneigten

Bild 48.



Backen des Spaltes zwei teilweise einander überdeckende Spektren ergeben, wenn ein Prisma mit seiner brechenden Kante parallel der Winkelhalbierenden beider Spaltrichtungen aufgestellt wird. Störend wirkt hierbei, daß durch die umgebenden Farben Kontrast- und Ermüdungserscheinungen auftreten, die eine richtige Beurteilung des Farbwertes sehr erschweren, zumal ein Vergleichsfeld nicht unmittelbar neben das zu untersuchende Farbengemisch gesetzt werden kann.

Eine bessere Lösung der Aufgabe ist von Helmholtz gegeben worden. Von einem Spalt S_1 wird in der üblichen Weise durch ein

Prisma P und zwei Objektive L_1 und L_2 ein Spektrum erzeugt auf einem Schirm S_2, der zwei Spalte trägt, die sowohl gegeneinander, als auch in ihrer Breite verstellbar sind, so daß an zwei Stellen des Spektrums Bezirke von gewünschter Breite durchgelassen werden können (Bild 48). Bildet man nun durch eine unmittelbar hinter den Spalten befindliche Linse eine Blende B_1 in der Ebene B_2 ab, so muß das Bild der Blende B_1 gleichmäßig beleuchtet in der Mischfarbe erscheinen.

Eine etwas andere Anordnung ist von Maxwell angegeben und benutzt worden. Bringt man das Auge vor den Spalt und bringt man am Ort des Spektrums Blenden an, so erblickt man, wenn diese mit weißem Licht beleuchtet werden, wegen der Umkehrbarkeit des Strahlenganges die Kollimatorlinse in der Mischfarbe derjenigen Wellenlängen leuchtend, die an der Stelle der Blendenöffnungen im Spektrum liegen würden.

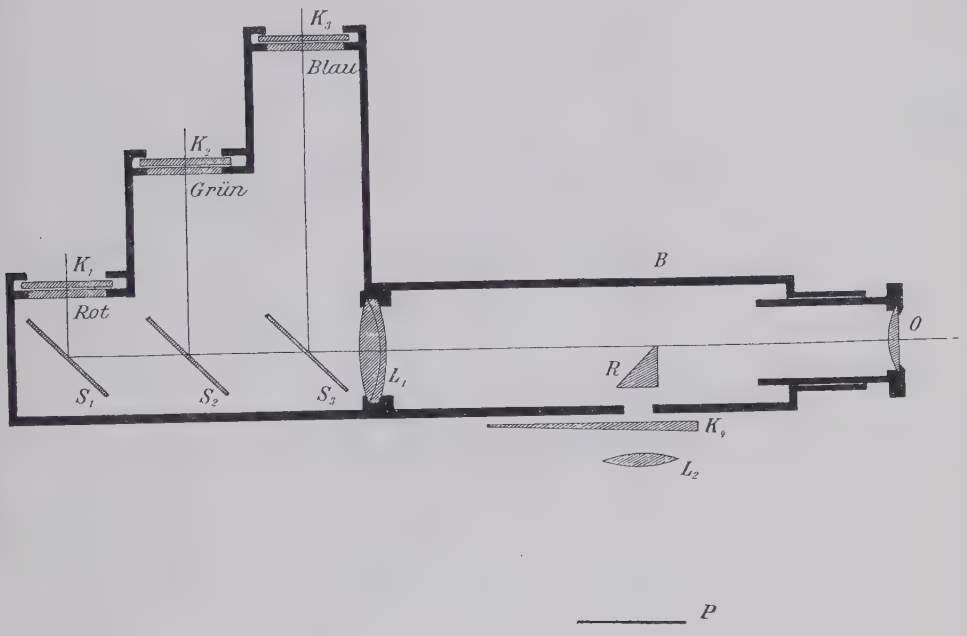
Für die Ermittlung der Mischfarbe größerer zusammenhängender Bereiche ist von Arons ein Apparat angegeben worden, der die bei Kristallen im polarisierten Licht auftretenden Farben benutzt. In einfachster Form besteht dieser Apparat, der gleichzeitig zu einer zahlenmäßigen Darstellung aller Farbentöne dienen sollte, aus zwei gegeneinander drehbaren Polarisationsprismen, zwischen welche Quarzplatten eingeschaltet werden können, die senkrecht zur Kristallachse geschnitten sind. Der Winkel zwischen den Schwingungsebenen der Polarisationsprismen einerseits und die Dicke der Quarzplatte andererseits werden von Arons als Bestimmungsstücke des Farbentones benutzt, wobei mit wachsender Dicke die Färbung immer weißlicher wird.

A. v. Hübl geht von drei Grundfarben aus, die durch Lichtfilter L_1, L_2, L_3 aus weißem Licht ausgesondert werden und die der Bedingung genügen müssen, daß sie, in bestimmtem Verhältnis gemischt, den Eindruck des Weiß hervorbringen. Als Filter benutzt v. Hübl Gelatineschichten, die in der Weise hergestellt sind, daß 6 g Gelatine in 100 ccm Wasser gelöst werden, und von dieser mit Farbstoff versetzten Gelatinelösung 8 ccm auf 100 qcm Fläche einer Glasplatte aufgegossen und gut horizontal getrocknet werden. Die Farbstoffmengen auf 100 ccm Gelatinelösung sind:

für rot	Tatrazin 2,0 g Erythrosin 1,0 g Säurerhodamin 1,04 g
für grün	Tatrazin 2,0 g Patentblau 0,8 g
für blau	Patentblau 1,0 g Säurerhodamin 2,0 g.

Um die Helligkeiten der einzelnen Farben abstufen zu können, werden vor den Filtern Keile aus grauem Glase K_1, K_2, K_3 angebracht, die je nach der Dicke der Glasschicht einen mehr oder minder großen Teil des Lichtes, und zwar von allen Wellenlängen gleichmäßig, absorbieren. (Bild 49). Die Glasplatten S_1, S_2, S_3 werfen das einfallende Licht auf die Linse L_1, die die Bilder der Eintrittsöffnungen in der Blendenebene B erzeugt. Befindet sich bei P ein gefärbtes Objekt, so können bei passender Stellung der Keile K_1—K_3 und des Abschwächungskeiles K_4 die Farben der Gesichtsfeldteile gleichgemacht werden; da bei Beobachtung mit dem Okular O die

Bild 49.



Felder, deren eines durch die Mischfarbe der Filter, deren anderes durch das Bild von P gegeben ist, mit der scharfen Kante des kleinen Prismas R aneinanderstoßen, so ist ein photometrischer Vergleich ebenso leicht möglich, wie ein Vergleich des Farbtones.

Auf anderem Wege erreicht Ostwald den Farbenvergleich. Er bestimmt die Farbe durch Ermittlung ihrer Gegenfarbe, indem durch ein Wollastonsches Prisma die Bilder übereinandergelagert werden, wobei ihre Intensität durch ein vorgeschaltetes drehbares Nicolsches Prisma verändert werden kann, weil die durch das Wollastonsche Prisma erzeugten Bilder linear polarisiert sind und ihre Schwingungen senkrecht zueinander erfolgen. Liegt ein farbiger Aufstrich vor, so kann dessen

Farbe vermittelst des Farbenmischapparates (Pomi) auch auf zwei andere, als Grundfarben gewählte, bezogen werden.

Die älteste für objektive Vorführungen sehr geeignete Methode bedient sich des Kreisels oder einer rotierenden Scheibe (S. 93). Bei hinreichend schneller Drehung erscheint die in verschiedenfarbige Sektoren geteilte Kreisscheibe in der Mischfarbe. Soweit die additive Mischung von Körperfarben in Frage kommt, lassen sich alle Gesetzmäßigkeiten in einfacher Weise vorführen, vor allem die Mischung von Komplementärfarben zu neutralem Grau. Da aber die Körperfarben stets einen größeren Bezirk von Wellenlängen umfassen, ist die Zurückführung auf reine Spektralfarben mit dem Kreisel nicht möglich.

§ 35. Physische und psychische Wirkungen der Strahlung.

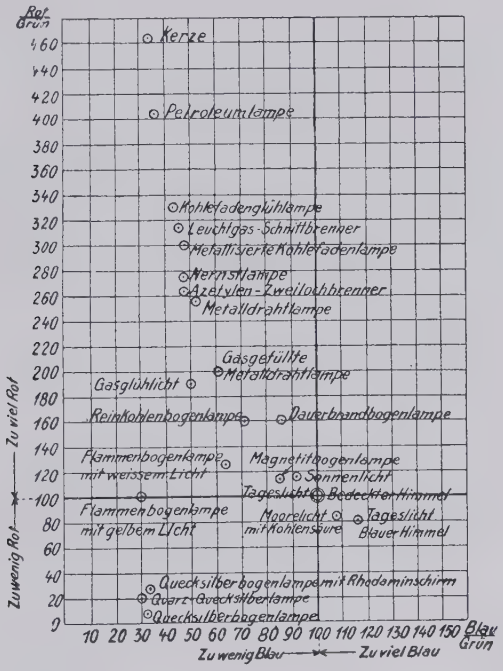
Von dem gesamten Wellenlängenbereich, der in der Strahlung leuchtender Körper enthalten ist, kommt nur ein geringer Teil für die Erregung der Lichtempfindung in Frage. Wirkungslos sind aber die übrigen Strahlungsarten nicht. Während aber die schädliche Wirkung der ultraroten Wärmestrahlung seltener auftreten wird, weil bereits die Wärmeempfindung in den Hautnerven eine zu große Annäherung an Strahlungsquellen verhindert, die im Ultrarot große Energiemengen aussenden, besitzt der menschliche Körper kein Organ, das die Anwesenheit schädigender ultravioletter Strahlen unmittelbar anzeigt. Diese sind sowohl imstande, chemische Prozesse auszulösen, als auch physiologisch zu wirken. Ihre therapeutische Anwendung ist bekannt; sie dienen dazu, krankhafte Prozesse im menschlichen Körper durch die Entzündungen, die sie hervorrufen, zu beeinflussen. Als Lichtquelle dient häufig die an ultravioletten Strahlen sehr reiche Quarzquecksilberlampe (Höhensonne). Die Einwirkung beschränkt sich meist auf die äußeren Hautschichten; sie kann auch durch die im Sonnenlicht enthaltenen kurzwellige Strahlung hervorgerufen werden, wenn die Luft für diese durchlässig genug ist, wie es in größerer Höhe über dem Meeresniveau, in Gebirgen, der Fall ist (Gletscherbrand).

Die Wirkungen ultravioletten Lichtes betreffen das äußere Auge, die Linse und die Netzhaut. In letzterer kann bei starker Einwirkung eine Auflösung der Chromatinsubstanz der Ganglienzellen, Ausbleichung und Formveränderung der Körner der äußeren Körnerschicht auftreten. Zieht man in Betracht, daß auch Trübungen der Linse durch Zellenzerfall beobachtet worden sind, daß überhaupt die Linse die Wellenlängen unterhalb 375 $\mu\mu$ fast vollständig absorbiert, so ist es klar, daß es notwendig ist, bei Vorhandensein starken ultravioletten Lichtes die Augen hinreichend zu schützen. Strahlen unterhalb 320 $\mu\mu$ bewirken die häufig

auftretende Entzündung der Hornhaut (Frühjahrskatarrh). Cramer führt den Glasmacherstar auf die Einwirkung kurzwelliger Strahlen zurück.

Da nun das gewöhnliche Kronglas, das in der Mehrzahl der Fälle, auch wenn es durch Zusatz färbender Metalloxyde eine größere Absorptionsfähigkeit für das sichtbare Gebiet aufweist, immer noch reichlich ultraviolettes Licht durchläßt, so ist eine genaue Untersuchung der Schutzbrillen auf Durchlässigkeit für das schädliche Wellenlängengebiet geboten, besonders für die Verwendung im Hochgebirge und bei Skitouren, weil

Bild 50.



grell beleuchtete Schneeflächen ultraviolett stark reflektieren. Es werden als Schutzgläser sowohl graue und blaue Gläser empfohlen, die jedoch nicht sehr wirksam sind, als auch Spezialschmelzen, wie Fienzal-, Enixanthos- und Euphosglas, welch letzteres von Schanz als besonders geeignet bezeichnet wird.

Neuerdings sind von Crokes Gläser hergestellt, die, ohne merkliche Färbung aufzuweisen, über 90 % aller ultraroten Strahlung absorbieren, sich also zur Verwendung als Schutzbrillen für Ultrarot gut eignen. Es sind von ihm über 200 Glasarten untersucht, die Beimengungen von Cer, Chrom, Kobalt, Kupfer, Eisen, Blei, Mangan, Neodym, Nickel, Praseodym und Uran enthielten.

Für die richtige Beurteilung von Farben ist es wichtig, entweder die Lichtquelle in ihrer spektralen Zusammensetzung dem Tageslicht gleichzumachen oder aber durch passend gefärbte Brillen die bei verschiedenen Beleuchtungsarten auftretenden Farbenunterschiede bei Körperfarben auszugleichen. Der letzte Weg, der auch von Weiß beschritten worden ist, hat sich als wenig gangbar erwiesen. Besser ist die erste Lösung der Aufgabe. Bloch hat zu diesem Zwecke eine große Zahl der gebräuchlichen Lichtquellen auf ihren Gehalt an Rot, Grün und Blau geprüft und sie nach ihrem auf Grün bezogenen Gehalt an Rot und Blau in ein Schaubild eingetragen (Bild 50). Gegenüber dem Tageslicht enthalten die meisten Lichtquellen zu viel Rot und sämtliche, mit Ausnahme des Moorelichtes mit Kohlensäure zu wenig Blau (vgl. § 21). Der Ausgleich kann bei den neuen gasgefüllten Metallfadenlampen ohne allzu großen Energieverlust durch Filter bewirkt werden.

Ein wichtiges, bisher aber noch nicht völlig untersuchtes Gebiet ist das der Einwirkung bestimmter Farben auf psychisches Empfinden. Bekannt ist, daß die sogenannten warmen Farben Rot und Gelb angenehmere Empfindungen auslösen als die kalten Farben, was auch in der symbolischen Bedeutung der Farben ihren Ausdruck findet, wobei jedoch eine Übereinstimmung nur innerhalb bestimmter Völkerfamilien festzustellen ist. Für die Indogermanen gilt beispielsweise Schwarz als Farbe der Trauer, während bei den Chinesen Weiß die gleiche Bedeutung hat.

Eng verknüpft sind diese Erscheinungen mit dem Farbenhören, Farbensehen und Farbenschmecken. Es ist einwandfrei festgestellt, daß Blinde aus der Wirkung auf die Tastnerven eine sichere Unterscheidung warmer und kalter Körperfarben abzuleiten vermögen und daß auch durch andere Sinnesempfindungen zwangsmäßig bestimmte Lichtempfindungen ausgelöst werden können. Frühzeitig schon ist, auch außerhalb des Gebietes der Malerei, versucht worden, durch räumliche und zeitliche Aufeinanderfolge von Farbeneindrücken harmonische Empfindungen auszulösen, ähnlich wie es bei musikalischen Vorführungen der Fall ist. (Farbenorgel, farbig leuchtende Springbrunnen, Feuerwerk.)

Auch bei Tieren und Pflanzen sind differenzierte Wirkungen der verschiedenen Farben beobachtet worden, doch ist diese automatische Orientierung nach der Lichtquelle (Heliotropismus) wohl auf reine chemische Wirkungen des Lichtes auf Oberflächenelemente zurückzuführen, da von Blaauw und Fröschl festgestellt worden ist, daß die heliotropen Reaktionen bei Pflanzen dem Gesetz der photochemischen Wirkung folgen, daß sie der Lichtintensität und der Dauer der Belichtung proportional ist, wobei blaue Strahlen am wirksamsten sind.

Abschnitt VI.

Die zeitliche Änderung der Reize.

§ 36. Ansteigen und Abklingen der Lichtempfindung. Talbotsches Gesetz.

Es ist bereits angegeben, daß die Empfindung nicht augenblicklich in der dem Reiz entsprechenden Stärke einsetzt und daß sie nicht mit dem Aufhören des Reizes vollkommen erlischt, sondern langsam ausklingt (§ 32). Anstieg wie Abklingen sind abhängig von der Intensität des Reizes und von der Wellenlänge des Lichtes. Bei verschiedener Helligkeit zweier zu vergleichender Felder, also bei photometrischer Einstellung, ist es möglich, den Unterschied durch Wahl bestimmter Beobachtungszeiten subjektiv zu vergrößern: das stärker beleuchtete Feld bewirkt ein schnelleres Ansteigen des Reizes und der Helligkeitsunterschied kann infolgedessen besser wahrgenommen werden. Eine größere Verwendung hat jedoch dieses „chronophotometrische" Verfahren bislang noch nicht gefunden; doch wird auch von Schönrock angegeben, daß es für polarimetrische Messungen vorteilhaft ist, nachdem die Einstellung erfolgt ist, das Auge auf einige Zeit zu schließen und dann erneut die Vergleichsfelder zu beobachten, weil dann noch vorhandene Unterschiede deutlicher hervortreten.

Aus dem Vorhandensein dieser Erscheinungen des Anstiegs und des Abklingens ist zu schließen, daß bei schnell aufeinanderfolgenden Reizen eine Trennung der einzelnen Reize nicht mehr erzielt werden kann. Wäre das Gesetz der zeitlichen Reizänderung genau bekannt, so könnte man unter Anwendung des Fechnerschen Gesetzes den Zusammenhang zwischen Reizdauer und Lichtintensität ermitteln, der für gerade verschmelzende aufeinanderfolgende Einzelreize besteht. Ganz allgemein ergibt sich, daß die zeitliche Aufeinanderfolge um so schneller sein muss, die Wechselzahl in der Zeiteinheit also um so größer, je höher die Lichtintensität ist. Bezeichnet man als Verschmelzungsfrequenz diejenige, bei welcher der gleichmäßige Eindruck, welchem ein eigenartiges Flimmern vorausgeht, gerade einsetzt, so erhält man den in Bild 51 dargestellten

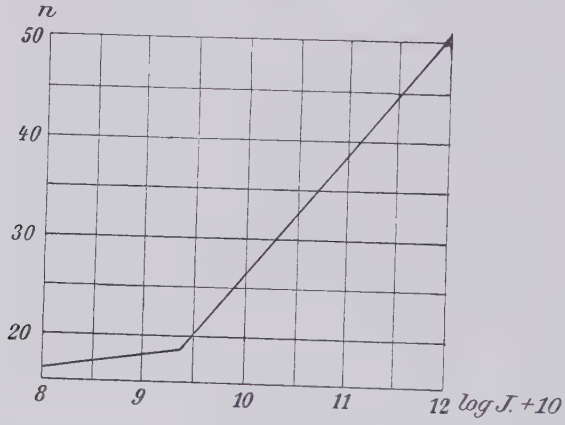
Verlauf, wobei als Abszisse der Logarithmus der Intensität, vermehrt um 10, als Ordinate die Verschmelzungsfrequenz n aufgetragen ist. Die Verschmelzungsfrequenz läßt sich also durch zwei gerade Linien darstellen, von denen die eine, für geringe Helligkeiten geltende, dem Dunkelapparat des Auges zugehört, die andere dem Hellapparat. Sie sind dargestellt durch die Gleichungen

$$n = 1{,}25 \log J + 19{,}25 \text{ für geringe Beleuchtungsstärken}$$

und $$n = 12{,}11 \log J + 26{,}21 \text{ für größere „}$$

Diese umfassen die Porterschen Beobachtungswerte und der aus ihnen folgende Schnittpunkt liegt bei etwa 0,25 Meterkerzen Beleuchtungsstärke. Ganz ähnliche Beziehungen erhält man für die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Beleuchtungsstärke nach den Beobachtungen von König, wobei,

Bild 51.



wie schon von v. Kries bemerkt worden ist, der Knickpunkt für den gleichen Intensitätswert auftritt. Naturgemäß gelten diese Beziehungen nur bis zu denjenigen Helligkeitsstufen, für welche Blendung noch nicht auftritt; auch für sehr geringe Helligkeiten ist die Gleichung nur bedingt gültig, da der Einfluß der Adaptation noch nicht genau festgestellt ist.

H. v. Helmholtz hat darauf hingewiesen, daß die Verschmelzungsfrequenz durch die Dauer des Lichtreizes in Vergleich zur Dunkelpause beeinflußt wird. Läßt man eine Scheibe rotieren, wie sie in Bild 52 dargestellt ist, bei der also von außen nach innen das Verhältnis v der weißen Sektoren zu den schwarzen von 3 : 1 bis 1 : 3 abnimmt, so hört das Flimmern nicht für alle Teile der Scheibe gleichzeitig auf. Es zeigt sich, daß bei steigender Umdrehungsgeschwindigkeit das Flimmern zuerst in den äußeren und inneren Teilen der Scheibe aussetzt, während für den mittleren Teil eine Verschmelzung noch nicht stattfindet. Marbe hat, allerdings nur für eine Beleuchtungsstärke, Zahlenwerte für die

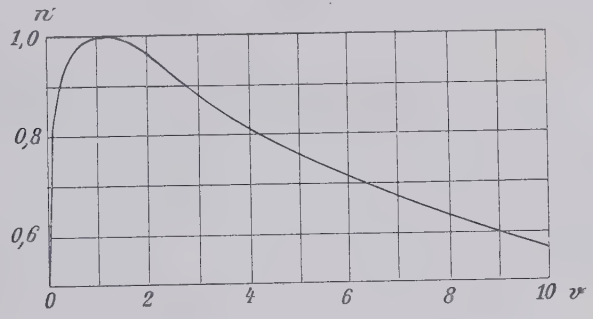
relative Verschmelzungsfrequenz n' ermittelt, die sich aus Bild 53 ergeben. n' gibt dabei die Zahl, mit der die absolute Verschmelzungsfrequenz für das Sektorenverhältnis 1 : 1 zu multiplizieren ist, um die absolute Verschmelzungsfrequenz für das in Frage stehende Sektorenverhältnis zu ermitteln.

Geben diese Untersuchungen auch die Gesetzmäßigkeiten für die zur Erzeugung eines einheitlichen Eindruckes erforderliche Wechselzahl, so ist doch noch keine Bestimmung der Größe des Reizes erfolgt, der von periodisch aufeinanderfolgenden, ungleich starken Reizen hervorgerufen wird. Diese auch für die Theorie des Farbenkreisels wichtige Frage wird durch das Talbotsche Gesetz beantwortet, das nach Helmholtz in der folgenden Form ausgesprochen werden kann:

Bild 52.

Wenn eine Stelle der Netzhaut von periodisch veränderlichem und regelmäßig in derselben Weise wiederkehrendem Lichte getroffen wird und die Dauer der Periode hinreichend kurz ist, so entsteht ein kontinuierlicher Eindruck, der dem gleich ist, welcher entstehen würde, wenn das während einer Periode eintreffende Licht gleichmäßig über die ganze Dauer der Periode erteilt sein würde.

Bild 53.



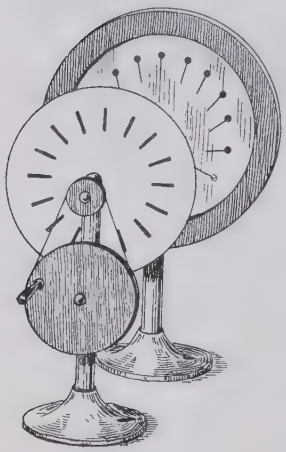
Bei der strengen Gültigkeit dieses Gesetzes ist es also möglich, durch rotierende Scheiben, in denen Sektoren von verschiedenem Öffnungswinkel ausgeschnitten sind, das Licht in meßbarem Betrage zu schwächen. Dieses von Lummer und Brodhun angegebene Verfahren, das in der Photometrie Verwendung gefunden hat, ist dadurch ausgezeichnet, daß die Schwächung für alle Wellenlängen in genau gleicher Größe erfolgt, was bei den meisten anderen Schwächungsmethoden (Spiegel, Rauchglaskeile, Polarisationsprismen) nicht der Fall ist. Für die Flimmer-

photometrie folgt, daß die Wechselfrequenz stets kleiner gewählt werden muß als die Verschmelzungsfrequenz und daß die Messung mit steigender Wechselzahl ungenauer wird.

§ 37. Die Auffassung von Bewegungsvorgängen. Kinematographie.

Wie bei einem Bilde die einzelnen Farbflecken, auch wenn sie ohne Übergang in endlicher Größe nebeneinander sich befinden, für das betrachtende Auge bei hinreichendem Beobachtungsabstand zu einem Gesamtbild verschmelzen und alle Übergänge auch durch unstetige Farben- oder Helligkeitsreihen wiedergegeben werden können, weil ein gewisser Schwellenwert existiert, so werden auch unstetig verlaufende Bewegungen als stetig wahrgenommen, wenn die einzelnen Phasen der Bedingung genügen, daß sie den Verlauf der Bewegung deutlich erkennen lassen. Vor etwa 100 Jahren (1832) wurden von Stampfer und Plateau einfache Apparate erfunden, die geeignet waren, eine Reihe von Bewegungsphasen zu einem bewegten Bilde zu vereinigen. Diese Stroboskope (auch Phenaskistoskope oder Lebensräder genannt) bestanden aus rotierenden Scheiben, auf deren Umfang die Einzelbilder eines Bewegungsvorganges wiedergegeben waren. Durch mit gleicher Winkelgeschwindigkeit bewegte Spalte in einem ruhenden Spiegel mit ruhendem Auge betrachtet, erscheint der abgebildete Gegenstand z. B. ein Pendel bewegt (Bild 54). Eine Reihe weiterer Apparate, wie die Wundertrommel, das Zootrop und das noch vor kurzem viel gezeigte Mutoskop, bei dem die auf einer Achse befestigten Bilder einzelner Bewegungsphasen in schneller Folge dem Auge dargeboten werden, bilden den Übergang zu dem heute weit verbreiteten Kinematographen, dessen einfachste Form bereits von F. v. Uchatius im Jahre 1845 angegeben ist; er brachte die Einzelbilder auf einer Kreisscheibe an, die gleichzeitig mit einer Blendenscheibe in einen Projektionsapparat eingeschaltet wurde. Es konnte sich dabei, weil auf dem Umfang der Scheibe nur eine beschränkte Zahl von Bildern Platz finden konnte, im wesentlichen nur um periodisch wiederkehrende Bewegungsvorgänge handeln.

Bild 54.

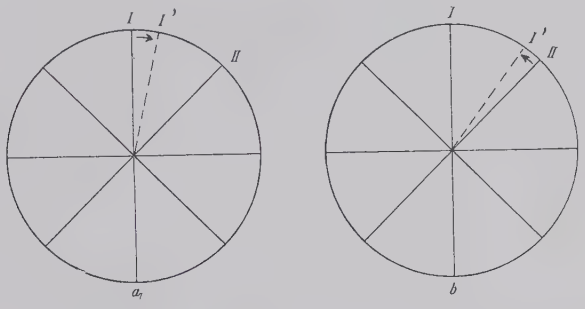


Neuerdings sind „bewegte Photographien“ angefertigt worden, bei denen die einzelnen Bilder in Streifen aufgelöst sind, in deren Zwischenräume sich die übrigen Bilder einschieben. Sie werden hinter einem Strichgitter verschoben. Dadurch werden stets nur bestimmte Teilbilder

sichtbar, die bei der Verschiebung ineinander übergehen, wobei die Streifen des Gitters den Bilderstreifen parallel laufen müssen.

Bei allen diesen Apparaten sind die Einzelbilder merklich voneinander verschieden. Trotzdem findet eine Verbindung der einzelnen Bewegungsphasen solange statt, als eine Identifikation der einzelnen Bilder noch möglich ist und zwar werden von verschiedenen möglichen Verbindungen stets diejenigen als zu einer stetigen Bewegung gehörend aufgefaßt, die einander am nächsten liegen. Ist ein um seine Achse sich drehendes Rad gegeben, das acht Speichen hat, so werden bei langsamerer Drehung oder schnell genug aufeinanderfolgenden Aufnahmen die Bilder gegeneinander um weniger als $^1/_{16}$ des Kreisumfanges gedreht sein (Bild 55 a). Es wird also der richtige Drehungssinn wahrgenommen werden. Ist die Drehung schneller, so daß die Bilder zweier folgender Aufnahmen um mehr als $^1/_{16}$ gedreht sind, so wird bei gleichem Aus-

Bild 55.



sehen der Speichen eine Zuordnung zweier benachbarter Speichen stattfinden und die Bewegung in entgegengesetztem Sinne zu erfolgen scheinen (Bild 55 b). In den Bildern sind die Speichen für die erste Aufnahme ausgezogen, für die zweite Aufnahme gestrichelt angedeutet und ihre Zugehörigkeit ist durch beigefügte Zahlen gekennzeichnet. Die Identifikationstäuschung bei kinematographischen Aufnahmen (Radphänomen) kann bei allen periodischen Bewegungen auftreten und kann gegebenenfalls auch den Eindruck der Ruhe hervorrufen.

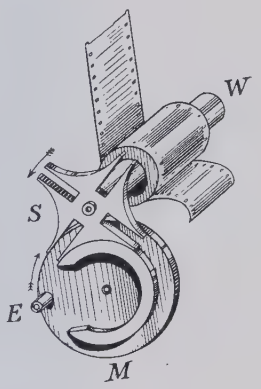
Ist der Weg, den der Körper zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern zurückgelegt hat, zu groß, größer als der scheinbare Durchmesser des Körpers, so scheint die Bewegung sprungweise zu erfolgen. Das hierbei auftretende Flimmern, das von dem bei unveränderten Bildern infolge des Wechsels von Licht- und Dunkelpausen auftretenden wohl zu unterscheiden ist, kann nur durch Erhöhung der Aufnahmefrequenz ausgeglichen werden. Eine vollkommen „naturwahre", nicht flimmernde Wiedergabe von Bewegungsvorgängen mit Hilfe kinematographischer

Apparate erfordert also eine schnelle zeitliche Bildfolge, deren Frequenz sowohl von der Helligkeit, dem Verhältnis zwischen Bilddauer und Dunkelpause und von der Schnelligkeit der dargestellten Bewegungen abhängig ist. Da man im Interesse der Helligkeit des Bildes die Dunkelpausen möglichst klein macht, so ist eine Erhöhung der Frequenz nicht unbegrenzt möglich. Bei der üblichen Frequenz von 15—25 Bildern in der Sekunde würde bei einem Sektorenverhältnis von 4 : 1 im Mittel der Bildwechsel in weniger als $^1/_{80}$ Sekunde zu erfolgen haben, die Geschwindigkeit des Filmbandes also in der Dunkelpause bei einer Bildhöhe des Einzelbildes von 20 mm größer als 1,60 m in der Sekunde sein müssen. Die namentlich zu Anfang und zu Ende der Bewegung einsetzende Beanspruchung des Filmbandes würde demnach bei größeren Frequenzen zu groß werden. Um dennoch bei Wechselzahlen von etwa 25 in der Sekunde noch das Helligkeitsflimmern verschwinden zu lassen, werden bei den üblichen Apparaten, während das Bild steht, Dunkelpausen eingeschaltet, wodurch zwar ein bestimmter Betrag des Lichtes verloren geht, aber infolge der höheren Lichtwechselfrequenz ein gleichmäßiger Helligkeitseindruck erzeugt wird, während für die Darstellung der normalen Bewegungsvorgänge eine Bildfrequenz von 15—25 erhalten bleibt und auch völlig genügt.

Für wissenschaftliche und technische Zwecke ist es wichtig, auch die Bildfrequenz zu erhöhen. Dies kann dadurch geschehen, daß man bei stetig bewegtem Film entweder die Beleuchtung in hinreichend kurzen Zeiten einwirken läßt, oder indem man, wenigstens bei nicht allzu hohen Frequenzen, durch bewegte Spiegel die Bewegung des Bildes gegen den Film ausgleicht. Das letztere Verfahren ist praktisch ausgebaut in der Ernemannschen Zeitlupe, die Frequenzen bis zu 300 erreichen läßt, während für noch höhere Wechselzahlen die Beleuchtung durch Funken einer Batterie von Leydener Flaschen erfolgt. Es gelang Cranz (1909) mit seinem ballistischen Kinematographen 800 Bilder herzustellen, deren Frequenz 5000 war. Hierdurch war es bereits möglich, bei gleichmäßigen Filmgeschwindigkeiten von 120 m in der Sekunde die Vorgänge bei einem Schuß genau zu untersuchen. (Die Pendelbewegungen eines fallenden Tropfen sind schon mit Wechselzahlen von etwa 300 deutlich wahrzunehmen.) Für besondere Untersuchungen der Geschoßbewegung und der Geschoßwirkung waren noch höhere Frequenzen erforderlich; Schatte erzielte (1911) solche von 50000 und Cranz und Glatzel (1912) konnten bei ihrer Beleuchtungsvorrichtung die Frequenzen beliebig zwischen 2000 und 10000 einstellen. Ist es also bei derartigen Hochfrequenzaufnahmen möglich, zeitlich schnell verlaufende Vorgänge aufzulösen und damit die zeitliche Auflösungsfähigkeit des Auges zu vergrößern, so lassen sich andererseits durch schnellere Wiedergabe eines in größeren Zeiten verlaufenden Vorganges die Entwicklungsvorgänge

deutlich wiedergeben. Die Biologie hat schon zeitig daraus Nutzen gezogen: das Aufblühen einer Pflanze, Entwicklung von Kleinlebewesen sind Beispiele für die Zusammenfassung von langsam verlaufenden Bewegungsvorgängen, die zur direkten Beobachtung einer tagelangen angespannten Aufmerksamkeit bedürfen, wobei infolge der geringen Geschwindigkeit die einzelnen Bewegungsstufen vom Auge kaum wahrgenommen werden können; ferner sind die Flugbewegungen von Insekten und Vögeln, die Bewegungen beim Gehen, Springen, die Mundstellung beim Sprechen auf kinematographischem Wege untersucht. Auch die Technik hat sich dieses wichtige Verfahren zunutze gemacht, indem sie die bei Festigkeitsprüfungen auftretenden, äußerst schnell erfolgenden und darum dem Auge unsichtbaren Veränderungen des beanspruchten Materials kinematographisch festgestellt hat. Auf die vielseitige Anwendung für Lehrzwecke, zur Reklame und zur Unterhaltung sei nur hingewiesen; die große Bedeutung des Kinematographen in wissenschaftlicher Beziehung ist darin zu erblicken, daß die Grenzen des Wahrnehmungsvermögens für Bewegungen erweitert werden können, daß also der zeitliche Verlauf eines Vorganges nach Dauer und Richtung beliebig verändert werden kann.

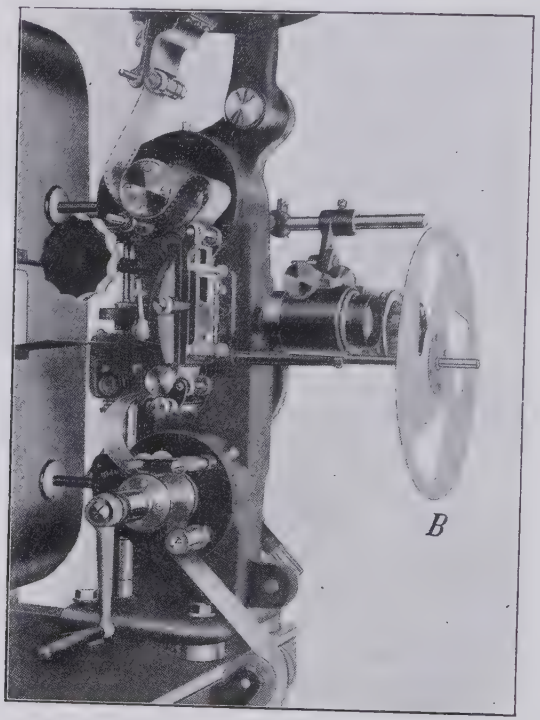
Bild 56.



Es mögen hier noch einige technische Einzelheiten kurz erwähnt werden. Die bisher am meisten verbreiteten kinematographischen Apparate, sowohl für Aufnahme wie für Vorführung, arbeiten mit ruckweiser Bewegung des Films. Die einfachste und zweckmäßigste Einrichtung, die der Bedingung genügt, daß der Film in der Ruhezeit völlig feststeht und bei der die Zeit des Wechsels gegen die Ruhezeit leicht den besonderen Forderungen angepaßt werden kann, ist die sogenannte Malteserkreuzsteuerung (Bild 56). Der Film wird durch eine Spannvorrichtung gegen die Walze W gepreßt, deren Zähne in die Lochreihen des Films eingreifen. Auf der gleichen Achse, wie die Walze, sitzt das Malteserkreuzrad S. Unmittelbar von einem Kurbelgetriebe oder durch einen Motor gedreht wird die Scheibe M, auf der ein Segment und der Stift E sich befinden. Längs des Segmentes gleiten die bogenförmigen Ausschnitte des Rades S. Erst wenn der Stift E in die radialen Schlitze von S eingreift, erfolgt eine Vierteldrehung des Malteserkreuzes und damit der Walze W. Die Drehrichtungen der Scheiben sind durch Pfeile angedeutet. Mit der Achse der Scheibe M ist die Blendenscheibe B gekuppelt (Bild 57), deren Ausschnitte eine Form haben, die den Helligkeitsanstieg und Abfall des Bildes gemäß den physiologisch günstigsten Wer-

ten regelt. Bei dem langsameren Anstieg zur größten Helligkeit nach der Dunkelpause wird das Flimmern bei gleicher Frequenz geringer als bei schnellerem Anwachsen der Intensität, wie es bei radial begrenzten Ausschnitten sich ergeben würde. Im übrigen zeigt Bild 57 deutlich den Weg des Films durch einen modernen Kinoprojektor der Firma Hahn-Kassel; die Malteserkreuzsteuerung ist durch das die Zahnräder nach außen abschließende Gehäuse verdeckt.

Bild 57.



Wie bei der Photographie das Bestreben nach naturtreuer Wiedergabe zum farbigen Bild führte, so hat man sich auch bemüht, das Dreifarbenverfahren in der Kinematographie einzuführen. Dafür ist zunächst die Feststellung wichtig, daß die Verschmelzungsfrequenz in dem Sinne von der Farbe abhängig ist, daß sie mit abnehmender physiologischer Helligkeit der Farben gleichfalls abnimmt. Es sind verschiedene Wege beschritten worden, um zu farbigen Films zu gelangen. Eine Ausmalung der Films kommt wegen der erforderlichen hohen Geschicklichkeit und der hohen Kosten nur in Ausnahmefällen in Frage. Da das Lumièresche Verfahren wegen der großen erforderlichen Belichtungszeiten und der geringen Helligkeit der Bilder sowie infolge technischer Schwierigkeiten

bislang keine Verwendung gefunden hat, ist versucht worden, durch gleichzeitige oder aufeinanderfolgende Projektion farbiger Teilbilder eine Wiedergabe in natürlichen Farben zu erreichen. Werden als Aufnahmefilter Rot, Grün, Blau gewählt und nimmt man drei Filme gleichzeitig auf, so kann das Auge bei Projektion dieser Filme unter Anwendung von passenden Wiedergabefiltern (§ 33) die drei Teilbilder zusammen auffassen. Die Hauptschwierigkeit ist dabei, die drei Bilder dauernd zur Deckung zu bringen. Von der Firma Gaumont ist kürzlich ein Apparat beschrieben, der es gestatten soll, die Projektionsobjektive während der Vorführung so einzustellen, daß die Deckung der Bilder stets erreicht werden kann.

Anstelle gleichzeitiger Wiedergabe der farbigen Einzelbilder können sie auch in zeitlicher Folge dem Auge dargeboten werden. Für die aufeinanderfolgende Projektion werden die den drei Grundfarben entsprechenden Aufnahmen auf einem Film gemacht. Gleichzeitig mit dem Fortschreiten des sensibilisierten Filmbandes dreht sich von dem Objektiv des Aufnahmeapparates eine Scheibe mit Filtern in den drei Grundfarben, so daß die 1., 4., 7., . . . Aufnahme dem Rot, die 2., 5., 8., . . . Aufnahme dem Grün, die 3., 6., 9., . . . Aufnahme dem Blau entspricht. Wird bei der Wiedergabe ebenfalls eine rotierende Filterscheibe benutzt, so verschmelzen bei richtiger Frequenz die sich zeitlich folgenden Bilder zu einem Gesamtbild in den natürlichen Farben. Ist die Frequenz nicht groß genug zur Verschmelzung, so veranlaßt der „Wettstreit der Farben“ eine neue Art des Flimmerns, dessen Gesetze, da hier die Folge von drei Farben in Betracht kommt, noch nicht vollständig ergründet sind. Während nämlich bei der Flimmerphotometrie auf das Verschmelzen von Farben von nahezu gleicher physiologischer Helligkeit eingestellt wird, kommt bei dieser Art der kinematographischen Wiedergabe die Verschmelzung von merklich verschieden hellen Bildern in Betracht, wofür naturgemäß eine viel höhere Frequenz erforderlich ist.

§ 38. Schwellenwerte der Bewegungsgrößen.

Wie bei der Wahrnehmung von Raumgrößen und Lichtreizen (Helligkeiten) bestimmte Schwellenwerte festzustellen sind, so läßt sich auch ein bestimmter Wert der Geschwindigkeit angeben, der eine augenblickliche Entscheidung über Ruhe oder Bewegung ermöglicht. Nach Aubert ist dies eine Winkelgeschwindigkeit von 1—2 Bogenminuten in der Sekunde, die aber nur für die besonderen Versuchsbedingungen gültig sein kann. Wird eine Marke fixiert und der zu beurteilende Gegenstand extrafoveal gesehen, so ergibt sich nach Aubert:

Winkelabstand von der Fovea	Kleinste wahrnehmbare Winkelgeschwindigkeit	Winkelabstand von der Fovea	Kleinste wahrnehmbare Winkelgeschwindigkeit
15′	54″	5° 10′	5′ 30″
1° 15′	1′ 45″	7°	6′ 44″ bis 8′ 45″
2° 15′	1′ 8″	8°	9′
3° 15′	3′ bis 4′	9°	15′

Der Einfluß der Größe des bewegten Gegenstandes ist dabei noch nicht erfaßt. Schwerer ist auch die Bewegung zu beurteilen, wenn keine ruhenden Vergleichsgegenstände sichtbar sind. Im Falle, daß der Gegenstand sich in einem von Vergleichspunkten völlig freien Raum bewegt, werden häufig Scheinbewegungen wahrgenommen, doch werden nach Bourdon Bewegungen von 14—21 Bogenminuten in der Sekunde in den meisten Fällen auch in diesem Falle noch richtig erkannt. Dieses würde übereinstimmen mit der Tatsache, daß die Verschmelzungsfrequenz für schwache Lichtreize etwa 20 beträgt, daß also der Reiz eines Netzhautelementes bei ruhendem Auge zeitlich deutlich unterschieden sein muß von dem des benachbarten, wenn anstelle der Wahrnehmung der Gesamtbahn des Körpers der Eindruck eines bewegten Körpers treten soll.

Wichtig ist es, daß an der Stelle direkten Sehens, wie von Basler beobachtet worden ist, bei Bewegungen von Körpern noch Ausweichungen aus der Gleichgewichtslage erkannt werden können, die nur 20 Sekunden im Winkelmaß betragen. Diese in der Fovea beobachtete Vergrößerung des Wahrnehmungsvermögens gilt ebenso für Randteile der Netzhaut.

Von Einfluß auf die Bewegungswahrnehmung ist das Gleiten der Netzhautbilder. Von einem bewegten Gegenstand wird nach Exner ein Nachbild hinterlassen derart, daß das in Wirklichkeit auf der gleichen Netzhautstelle verharrende Bild nun den Eindruck einer entgegengesetzt gerichteten Bewegung hervorruft.

Als bestimmend für den Bewegungseindruck kommen demnach in Frage: die Winkelgeschwindigkeit des Körpers, seine Größe, Helligkeit (und Farbe), die Anwesenheit ruhender Vergleichskörper, die Größe der Bewegung, der Ort der Netzhautreizung und endlich die Bewegung des Auges.

Abschnitt VII.

Räumliches Sehen.

§ 39. Monokulares und binokulares Sehen.

Das vom optischen Apparat des Auges auf der Netzhaut erzeugte Bild wird durch einen unerklärten psychischen Vorgang in Anschauungen übergeführt. Die Empfindung der Netzhautreizung wird auf äußere Ursachen bezogen und durch eine außerordentlich große Anzahl von Erfahrungen erhält das Urteil über Form, Größe und Lage der Gegenstände im Gesichtsfeld eine solche Sicherheit, daß die Netzhauteindrücke bezüglich der Entfernung der Gegenstände der Außenwelt, wenigstens innerhalb eines gewissen räumlichen Gebietes, meist richtig, also den durch den Tastsinn festzustellenden Tatsachen entsprechend, gewertet werden. Es zeigt sich jedoch, daß die Sicherheit der Entfernungsschätzung bei einäugigem Sehen ganz erheblich kleiner ist, als bei beidäugigem Sehen.

Für das monokulare Sehen kommt als Zeichen für die Entfernung eines Gegenstandes die Größe des Netzhautbildes in Frage. Je weiter sich ein Gegenstand vom Auge entfernt, desto kleiner wird sein Bild, wie sich aus den Gesetzen der Perspektive direkt entnehmen läßt. Wird das Bild so klein, daß es nur ein Netzhautelement bedeckt, so kann eine weitere Größenabnahme nicht mehr wahrgenommen werden, doch werden schon vorher, da Einzelheiten zur Feststellung der Größe erforderlich sind, die Urteile unsicher werden. Man wird, wenn die Entfernung eines Körpers geschätzt werden soll, somit mindestens einen Bilddurchmesser von zwei Netzhautelementen fordern müssen. Für einen Menschen von 1,50 m Größe wird demnach der Abstand x, bis zu dem eine Beurteilung der Entfernung vom Beobachter günstigstenfalles in Frage kommen kann, gegeben sein durch

$$\frac{x}{1{,}50} = \frac{16}{2 \,.\, 0{,}004}, \quad x = 3000 \text{ m},$$

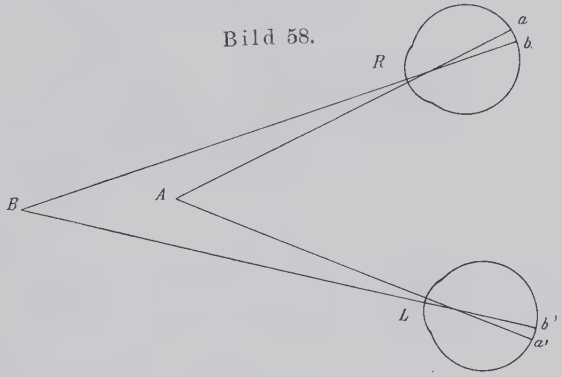
wenn der Zapfendurchmesser mit 0,004 mm angenommen wird. Streng genommen ist zu unterscheiden zwischen dem Sehen mit ruhendem und mit bewegtem Auge: für beide Arten des Sehens ist der Kreuzungspunkt

der Sehstrahlen, das Zentrum der Perspektive verschieden. Beim ruhenden Auge gehen alle Hauptstrahlen durch den Mittelpunkt der Eintrittspupille, welche durch das Bild der Iris, das durch die vorgelagerten Augenmedien entworfen wird, gegeben ist. Beim bewegten Auge gehen sie durch den etwa 13 mm hinter dem Hornhautscheitel gelegenen Augendrehpunkt. Soweit die physikalischen und physiologischen Grundlagen des räumlichen Sehens in Betracht kommen, können aber beide Punkte in den meisten Fällen als zusammenfallend angenommen werden, weil ihr Abstand gegen die Gegenstandsentfernungen als klein zu betrachten ist. Eine vollkommene Trennung des direkten Sehens (mit ruhendem Auge) und des indirekten Sehens (mit bewegtem Auge) ist auch deshalb kaum durchzuführen, weil im allgemeinen das Auge bei Betrachtung irgendwelcher Gegenstände schnell nacheinander die einzelnen Teilbilder auf die Netzhautgrube bringt und die unscharfen, außerhalb der Netzhautgrube entstehenden Bilder nur als Anhaltspunkte für die erforderlichen Augenbewegungen benutzt. Ob die Gegenstände dabei unmittelbar oder aber die durch optische Instrumente entworfenen Bilder betrachtet werden, ist ohne Einfluß. Die allgemeine Regel, nach der die Gesichtsvorstellungen zustande kommen, ist nach Helmholtz die, daß wir stets solche Objekte als im Gesichtsfeld vorhanden uns vorstellen, wie sie vorhanden sein müßten, um unter den gewöhnlichen normalen Bedingungen des Gebrauchs unserer Augen denselben Eindruck auf den Nervenapparat hervorzubringen. Man kann demnach von dem besonderen Strahlengang zunächst absehen und sich auf die Betrachtung der Strahlenneigungen beschränken, wie sie unmittelbar vor dem Eintritt in den optischen Apparat des Auges vorliegen.

Das monokulare Sehen, das sich auf der Richtungsverschiedenheit der Blicklinien aufbaut ist zunächst wesentlich flächenhafter Natur. Außer den aus dem perspektivischen Bilde erfahrungsgemäß zu entnehmenden Anhaltspunkten für die Ermittlung der Tiefenwerte kommen noch andere Ursachen in Betracht. Die Akkommodationstätigkeit des Auges kann freilich kaum mitwirken, weil die Akkommodationsarbeit sehr gering und außerdem die Tiefe, das gleichzeitig ohne merkliche Unschärfe wahrgenommene Entfernungsintervall, zu groß ist, um als hinreichend genaues Maß für die Entfernung gelten zu können. Ebensowenig kann die Größe von Häusern oder Bäumen einen guten Anhalt bieten, weil selbst bei gleicher Form die Abmessungen noch mannigfaltigen Änderungen unterworfen sein können; wohl aber gibt die aus den Umrissen zu entnehmende Überschneidung einen einigermaßen verwertbaren Maßstab für relative Tiefenbestimmungen, ferner die allgemeine Abnahme der Deutlichkeit von Einzelheiten. Ein Haus in 300 bis 400 m Entfernung läßt für ein normalsichtiges Auge noch deutlich die Lagerung der Ziegel erkennen, ein Baum in gleicher

Entfernung noch Blätter und Zweige, während darüber hinaus in beiden Fällen nur noch eine einheitliche Fläche wahrnehmbar ist. Bei noch größeren Entfernungen tritt die Luftperspektive hinzu, welche nicht nur die Konturen kleiner Gegenstände verwischt, sondern auch die Gegensätze der Farben vermindert. Für die Beurteilung irdischer Entfernungen kann bereits durch leichten Nebel ein starker Fehler im Sinne zu groß geschätzter Abstände eintreten, andererseits erscheinen bei klarer Luft, die die Wahrnehmung von Einzelheiten begünstigt, ferne Gegenstände nähergerückt. Als physikalischer Grund dafür, daß der Sternenhimmel als flache Schale und nicht als Halbkugel erscheint, kann diese Verundeutlichung durch dickere Luftschichten angeführt werden, weshalb auch Sonne und Mond beim Auf- und Untergang größer erscheinen müssen, als in größerer Höhe über dem Horizont (vgl. S. 138).

Bild 58.



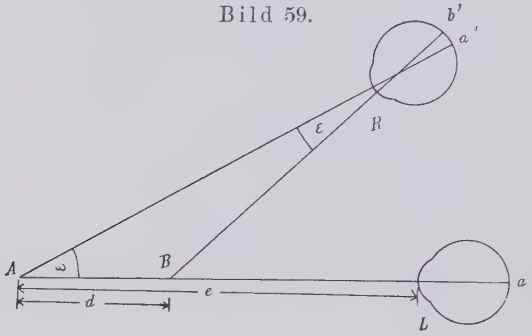
Ein weiteres Hilfsmittel zur Schätzung von Tiefenwerten beim einäugigen Sehen bildet die Verteilung und Färbung des Schattens, was besonders gut zu beobachten ist bei Betrachtung von Reliefbildern, wobei jedoch auch deutlich die Möglichkeit einer doppelten Auffassung zutage tritt. Je nach der Verteilung des Schattens und dem vom Beobachter angenommenen Orte der schattengebenden Lichtquelle tritt bald ein erhabenes, bald ein vertieftes Bild in Erscheinung.

Bei Benutzung beider Augen kommen neue Bestimmungsmöglichkeiten hinzu, die innerhalb gewisser Grenzen eine sehr genaue Entfernungsermittlung zulassen. Zunächst einmal ist erforderlich, um die Bilder in beiden Augen auf die Netzhautgrube zu bringen, daß die Augenachsen eine nach der Entfernung größere oder geringere Konvergenz annehmen, wobei gleichzeitig eine entsprechende Akkommodation eintritt. Ist die Neigung der Augenachsen groß, wird sie also auf nahe Gegenstände gerichtet, so akkommodieren die Augen gewöhnlich zwangsläufig auf Nähe, bei parallelen Augenachsen entsprechend auf Ferne.

Fixiert man den Gegenstand A (Bild 58), so werden alle näher oder ferner liegenden Gegenstände, wie z. B. B, doppelt gesehen. Hält man zwei Bleistifte in verschiedener Entfernung vom Auge senkrecht zur Verbindungslinie der Augen vor eine helle Fläche, so treten die Doppelbilder deutlich hervor. Durch abwechselndes Schliessen der Augen kann die scheinbare gegenseitige Lage der Bilder festgestellt werden. Nur für die Punkte einer einzigen Fläche, deren Form mit der Akkommodationsentfernung sich ändert, verschmelzen die Bilder vollständig zu einem Gesamteindruck. Diese Fläche ist die Horopterfläche (Kernfläche).

Der Grund für das einfache Sehen mit beiden Augen muß in der Anordnung und Verbindung der Nervenfasern gesucht werden. Nach Müller sind „beide Augen gleichsam zwei Zweige mit einfacher Wurzel und jedes Teilchen der Wurzel ist gleichsam in zwei Zweige für beide

Bild 59.



Augen gespalten". Wenn also demnach in den Augen korrespondierende Netzhautelemente vorhanden sind, d. h. solche, welche bei gleichzeitiger Reizung nur einen Eindruck vermitteln, so muß die Wahrnehmung von Unterschieden in der Lage äußerer Gegenstände in ähnlicher Weise von der Verteilung der Netzhautelemente abhängig sein, wie die Erkennbarkeit und Sehschärfe bei monokularer Betrachtung, wobei jedoch in günstigen Fällen durch die nicht vollkommen gleichmäßige Verteilung der Netzhautelemente in den beiden Augen etwas höhere Empfindlichkeitswerte erreicht werden können. In der Tat hat sich gezeigt, daß die in Winkelmaß umgesetzten Werte für die Wahrnehmung eines Tiefenunterschiedes beim binokularen Sehen mindestens auf die gleiche Größe des physiologischen Grenzwinkels führen, wie bei der Bestimmung der Sehschärfe eines Auges.

Ist das linke Auge L (Bild 59) beispielsweise auf Punkt A gerichtet, dessen Entfernung vom Knotenpunkt des Auges e sein möge, so wird bei Fixation von A im rechten Auge das Bild a' des Punktes A auf die zu a korrespondierende Netzhautstelle fallen. Punkt B, der im

linken Auge auf dem gleichen Netzhautelement a abgebildet wird wie A, erzeugt im rechten Auge ein Bild b, das noch getrennt von a' wahrgenommen wird, wenn sein Abstand im Winkelmaß größer ist als der physiologische Grenzwinkel ε, für den nach den früheren Ausführungen im günstigsten Fall, der hier zutreffen dürfte, etwa 30'' angenommen werden können. Ist ω der Konvergenzwinkel der Augenachsen, so folgt, wenn die Entfernungen so groß gewählt werden, daß die Tangente dem Bogen gleich gesetzt werden kann

$$\omega = \frac{LR}{AL}; \qquad \omega + \varepsilon = \frac{LR}{BL}$$

oder wenn $LR = b$, $AL = e$ und $AB = d$ gesetzt wird

$$\frac{b}{e} + \varepsilon = \frac{b}{e-d}$$

$$\varepsilon = \frac{b \cdot d}{e(e-d)}.$$

Da d im allgemeinen klein gegen e gesetzt werden kann, so folgt

$$\varepsilon = \frac{b \cdot d}{e^2}; \qquad d = \frac{e^2 \cdot \varepsilon}{b}.$$

Der Fehler d der Tiefenwahrnehmung wächst also mit dem Quadrat der Entfernung e und nimmt ab mit zunehmendem Augenabstand b. Er ist ferner proportional der Größe des physiologischen Grenzwinkels ε.

Ist der Konvergenzwinkel ω auf den Wert ε gesunken, so hört jede unmittelbare Tiefenunterscheidung auf Grund des binokularen Sehens auf und man erhält aus

$$\omega = \varepsilon = \frac{LR}{AL} = \frac{b}{l_0}$$

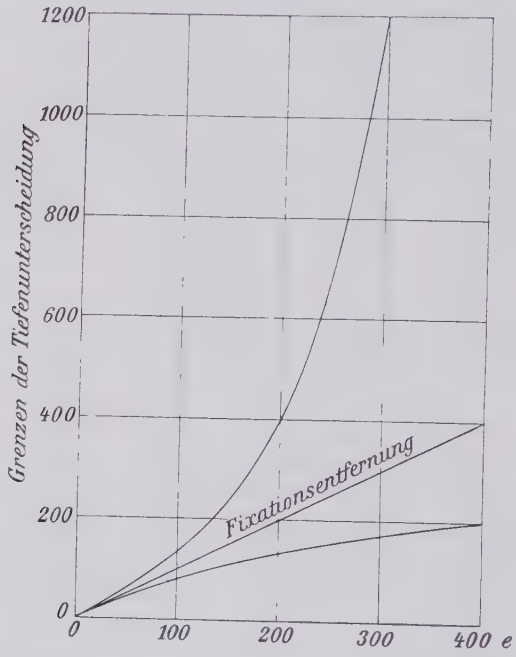
für einen mittleren Augenabstand von 60 mm den Wert

$$l_0 = \frac{b}{\varepsilon} = \frac{60\,\text{mm}}{0{,}00015} = 400\,\text{m};$$

diese Größe l_0 wird als Radius des stereoskopischen Sehens bezeichnet. Er ist von Auge zu Auge durch die Größe des physiologischen Grenzwinkels verschieden, ebenso auch von Beobachter zu Beobachter durch den Augenabstand, hängt aber auch von der Beschaffenheit der Gegenstände ab. Er kann für das unbewaffnete Auge zwischen 300 und 600 m schwanken, kann außerdem durch Verwendung geeigneter optischer Vorrichtungen vergrößert werden. Es läßt sich sowohl die Unterschiedsempfindlichkeit, die durch die Größe d für eine bestimmte Entfernung e gegeben ist (Bild 59), als auch der Radius des stereoskopischen Sehens l_0

vergrößern. Bild 60 gibt die Grenzen an, innerhalb deren für eine bestimmte Fixationsentfernung Tiefenunterschiede nicht mehr erkannt werden können, wobei jedoch zu bemerken ist, daß die auch beim monokularen Sehen mitwirkenden Tiefenunterscheidungshilfsmittel in den meisten Fällen eine genauere Unterscheidung ermöglichen, wie bereits daraus

Bild 60.



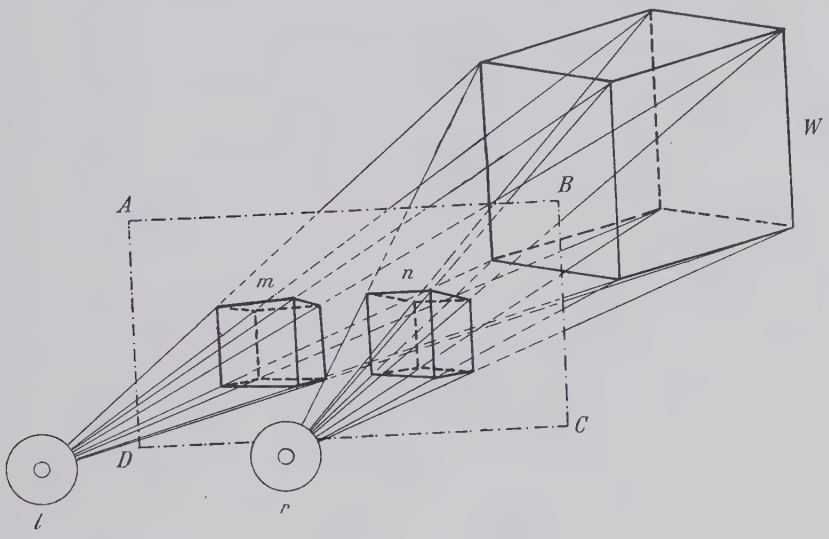
hervorgeht, daß bei Kenntnis der Gegenstandsgröße eine monokulare Entfernungsschätzung bis zu erheblich den Radius des stereoskopischen Sehens übersteigenden Entfernungen möglich ist.

§ 40. Stereoskopische Bilder.

Die verschiedene Lage der Augen gegenüber einem anvisierten Gegenstand bedingt, daß die Bilder beider Augen verschiedenes Aussehen haben. Sind die Augen durch l und r gegeben (l linkes Auge, r rechtes Auge) und ist W ein Würfel in größerer Entfernung, so schneiden die von den Würfelecken nach den Knotenpunkten der Augen gezogenen Hauptstrahlen die Ebene A B C D (Bild 61) in Punkten, die die Projektionsbilder m und n des Würfels ergeben. Die Projektionsebene A B C D ist vertikal angenommen und parallel zur Verbindungslinie der Augenachsen. Gleichheit der Bilder kann nur auftreten, wenn der Gegenstand

im Unendlichen liegt, doch sind auch in diesem Falle die Bilder für das rechte und linke Auge parallel zueinander verschoben. Jedes Einzelbild kann demgemäß nur für ein Auge ein naturgetreues Abbild der Wirklichkeit bieten. Der Eindruck der Körperlichkeit wird deshalb oft erhöht, wenn man ein Gemälde einäugig beobachtet, sobald der richtige Betrachtungsort (s. S. 110) gewählt wird. Bei binokularer Beobachtung muß zur Erzielung eines wirklichkeitstreuen Abbildes jedem Auge ein gesondertes Bild dargeboten werden, doch werden in vielen Fällen wegen des im Vergleich zum Betrachtungsabstande geringen Augenabstandes die Verschiedenheiten der Einzelbilder sehr geringfügig sein. Nur für

Bild 61.



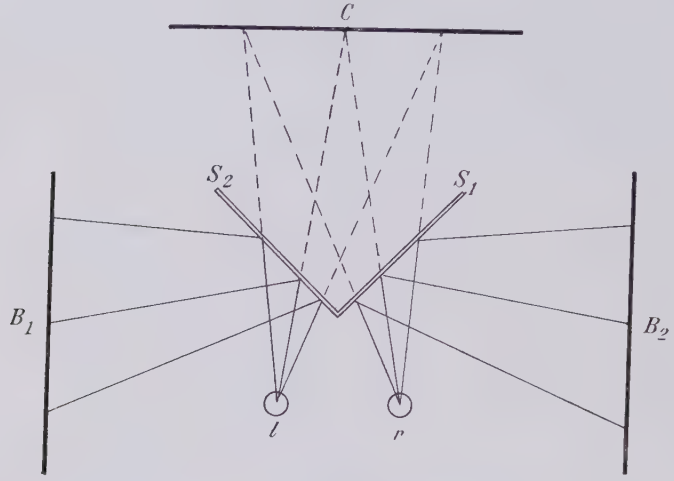
Gegenstandsentfernungen, die merklich kleiner als 200 m sind, treten diese Abweichungen deutlich hervor. Bei einigermaßen ausgedehntem Gesichtsfeld werden aber die beiden Teilbilder sich überdecken und es ist daher notwendig, durch geeignete Vorrichtungen die sich in Wirklichkeit überdeckenden Bilder getrennt den Augen darzubieten.

Bei einiger Übung ist es auch ohne Verwendung eines Apparates möglich, kleinere Teilbilder zu vereinigen. Richtet man die Augen auf einen weit entfernten Punkt, so daß die Augenachsen parallel sind, und bringt man nun die Teilbilder vor die Augen, so wird man bei Akkommodation auf die Bildentfernung deutlich ein räumliches Bild erkennen. Anfangs gelingt es freilich schwer, die Akkommodation auf Nähe zu erreichen, ohne daß gleichzeitig die Augenachsen konvergieren, später jedoch erreicht man ohne Schwierigkeit das „Schielen nach außen", wobei man deutlich neben dem räumlichen Mittelbilde die ebenen Seitenbilder

wahrnehmen kann. Bedingung ist freilich, daß der Abstand der Projektionszentren den Augenabstand nicht zu sehr überschreitet.

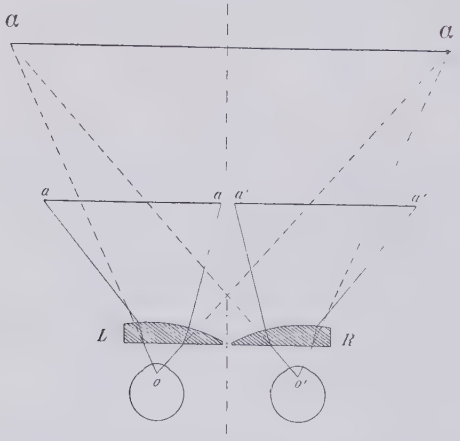
Einfacher und leichter läßt sich die Kombination der Teilbilder mit geeigneten Betrachtungsapparaten erreichen.

Bild 62.



Die älteste Form eines solchen Apparates stellt das Wheatstonesche Spiegelstereoskop dar (Bild 62). Dieses im Jahre 1833 erfundene,

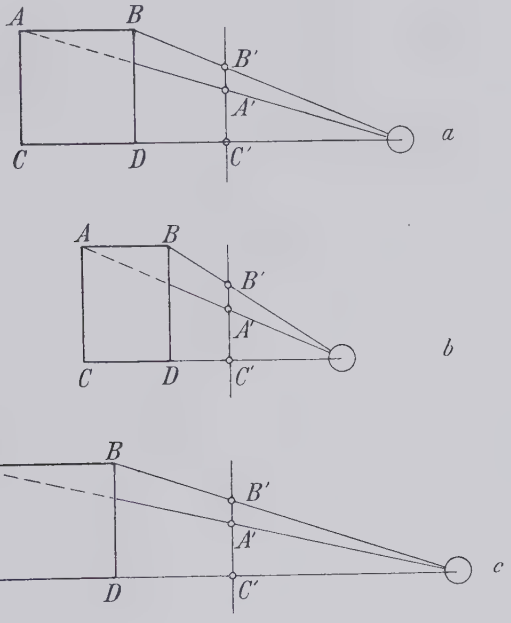
Bild 63.



1838 ausführlich beschriebene Spiegelstereoskop besteht aus zwei Spiegeln S_1 und S_2, die unter einem rechten Winkel gegeneinander geneigt sind. Die Einzelbilder befinden sich auf Schirmen B_1 und B_2. Durch die Spiegelung erscheinen beide Bilder in die Ebene C verlegt und verschmelzen zu einem räumlichen Gesamtbild. Außer der Schwierigkeit,

gleichmäßige Beleuchtung der Bilder B_1 und B_2 zu erzielen, weist das Wheatstonesche Stereoskop noch den grundsätzlichen Fehler auf, daß die Augen auf die geringen Entfernungen der Bilder akkommodieren müssen, während die Konvergenz der Augenachsen viel geringer sein muß, als der Akkommodationsentfernung entspricht. Sind diese Fehler auch bei dem viel verbreiteten Linsenstereoskop von Brewster (1843) vermieden, so erfordert es doch noch einen bestimmten Abstand der Teilbilder. Da aber der bei der Herstellung der Bilder gewählte Abstand der Perspektivitätspunkte nicht immer der Konstruktion der Linsenstereoskope angepaßt ist, so wird häufig ein falscher räumlicher

Bild 64.



Eindruck hervorgerufen. Bild 63 zeigt den Schnitt durch ein Linsenstereoskop nach Brewster, wobei L und R die gleichzeitig eine Winkelablenkung der Hauptstrahlen und eine Verlegung des Bildortes bewirkenden Halblinsen, a—a und a'—a' die Teilbilder, α—α den Ort der auf die Augen wirkenden optischen Bilder von a und a' bezeichnet. v. Helmholtz ersetzte die Halblinsen L und R durch zwei im Abstand veränderliche Vollinsen, wodurch die Möglichkeit gegeben war, die Linsen dem Abstand der Teilbilder anzupassen.

Meist werden die Stereoskopbilder, soweit sie nicht durch geometrische Konstruktion (bei einfachen Körpern, einfachen Maschinenteilen) gewonnen werden, in der Weise hergestellt, daß der Gegenstand mit

Hilfe zweier photographischer Objektive von genau gleicher Brennweite aufgenommen wird. Der Abstand der Objektive muß, wenn Betrachtung in einfachen Stereoskopen erfolgen soll, dem Augenabstand entsprechen, ihre optischen Achsen sollen parallel sein. Der räumliche, durch die Stereoskopbilder vermittelte Eindruck wird aber nur dann genau dem beim Betrachten des Gegenstandes selbst erhaltenen entsprechen, wenn die Brennweite der Aufnahmeobjektive gleich der Brennweite der bei der Betrachtung verwendeten Lupen ist. Andernfalls müssen notwendig Abweichungen auftreten, die entweder eine Veränderung (Verkleinerung oder Vergrößerung) der Tiefendimensionen oder aber eine Verzerrung der Gegenstände bewirken.

Es läßt sich dies bereits an dem einfacheren Falle monokularer Betrachtung nachweisen. Stellt A B C D einen Würfel dar (Bild 64) und ist A′B′C′ die Projektionsebene, so werden, wie aus Bild 64a zu entnehmen ist, die Bilder der Endpunkte in die Punkte A′ B′ C′ fallen. Nähert sich das betrachtende Auge (Bild 64b) und ist bekannt, daß die Strecken A B und C D senkrecht auf A C und B D stehen, so wird die Tiefendimension notwendig verkürzt erscheinen, im Falle zu großen Betrachtungsabstandes (Bild 64c) hingegen werden unter der gleichen Voraussetzung die Tiefenabmessungen vergrößert. Wird andererseits angenommen, daß die Tiefenwerte richtig eingeschätzt werden, so müssen, wie aus der Zeichnung abzuleiten ist, bei zu kurzem Betrachtungsabstand die weiter entfernten Teile des Gegenstandes zu groß, bei zu großem Betrachtungsabstande die weiter entfernten Teile zu klein erscheinen.

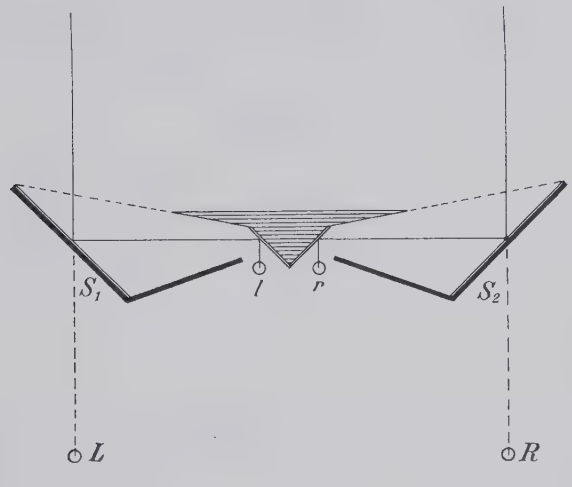
Hierauf ist der unnatürliche Eindruck zurückzuführen, den photographische, mit kleiner Brennweite aufgenommene Bilder hervorrufen. Um den richtigen Eindruck zu erhalten, müßte das Auge sich bis auf die Brennweite dem Bilde nähern, was wegen der Schwierigkeiten der Akkommodation nicht möglich ist. Beobachtet man ein solches Bild durch das Aufnahmeobjektiv oder eine Lupe von gleicher Brennweite, so zeigt sich selbst bei einäugiger Beobachtung eine überraschende körperliche Wirkung. Auch bei der Betrachtung von Gemälden ist es von Bedeutung, den richtigen Abstand einzuhalten.

Bei komplizierteren, nicht durch häufige Betrachtung bekannten Formen, wie Kristallen, Maschinenteilen, ist es nur schwer möglich, aus Schnittzeichnungen oder selbst aus perspektivischen Zeichnungen oder Photographien die räumliche Gestalt zu ermitteln. Für derartige Fälle wäre es erwünscht, eine möglichst weitgehende Verwendung des Stereoskopes durchzuführen. Wenn, wie es jetzt schon in der Industrie für die meisten Fabrikate angestrebt wird, auch die Stereoskope normiert würden, wäre es ein leichtes, in Büchern, Zeitschriften, Katalogen stereoskopische Bilder zu bringen, die eine viel richtigere Auffassung ermög-

lichen, als es bis jetzt auf Grund der für monokulare Betrachtung bestimmten Abbildungen der Fall ist.

Wie schon früher abgeleitet, ist eine räumliche Wahrnehmung nur bis etwa 400 m möglich. Will man die Grenze des stereoskopischen Sehens erweitern, so bleibt als einfachstes Mittel die Vergrößerung des Augenabstandes. Gelingt es, den Augenabstand auf 60 cm zu erweitern, so ist damit die Grenze des stereoskopischen Sehens bis zu etwa 4 km hinausgeschoben. Dieses „telestereoskopische" Sehen wird durch das Helmholtzsche Telestereoskop ermöglicht. Zu den zwei Spiegeln des Wheatstoneschen Stereoskops werden zwei weitere, zu ihnen parallele S_1 und S_2 gesetzt (Bild 65), deren Abstand beliebig gewählt werden

Bild 65.



kann. Um eine bequeme Justierung der Spiegel durchführen zu können, ist der eine Spiegel mit Mikrometerschraube, um eine horizontale, der andere um eine vertikale Achse drehbar. Der Augenabstand wird dadurch von l—r auf L—R vergrößert und damit der Parallaxenwinkel ω ebenfalls im gleichen Maße.

§ 41. Erweiterung der Grenzen des Sehens.

Durch die scheinbare Vergrößerung des Augenabstandes beim Helmholtzschen Telestereoskops ist bereits eine Erweiterung der Grenze des Tiefenunterscheidungsvermögens gegeben und damit der Beweis erbracht, daß es möglich ist, das Auge bei Benützung geeigneter Apparate auch für weitergehende Aufgaben zu verwenden. Für die Erkennbarkeit von kleinen Breitenunterschieden ist es erforderlich, den Sehwinkel zu ver-

größern. Mit Annäherung eines Körpers an das Auge wächst der Sehwinkel, aber diese Annäherung ist nicht immer in ausreichendem Maße möglich.

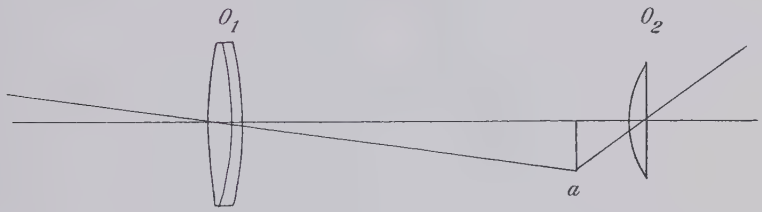
Bei sehr kleinen Gegenständen würde der zur Unterscheidung von Einzelheiten erforderliche Sehwinkel erst erzielt werden, wenn bereits die Grenze des deutlichen Sehens überschritten ist, der Gegenstand also sich zwischen Nahpunkt und Auge befindet. Setzt man nun zwischen Gegenstand und Auge eine einfache Sammellinse, eine Lupe, so wird, wie Bild 6 bereits zeigt, ein vergrößertes, aufrechtes virtuelles Bild in größerem Abstand vom Auge entstehen, welches für das Auge an Stelle des Gegenstandes selbst tritt. Die Vergrößerung der Lupe ergibt sich, wenn man die deutliche Sehweite (25 cm) durch die Brennweite der Lupe, ebenfalls in Zentimetern gemessen, dividiert. Hieraus folgt, daß für einigermaßen erhebliche Vergrößerungen die Brennweiten äußerst klein werden müßten. Die einfachen, eine punktweise Abbildung voraussetzenden Gesetze, nach denen gerade Linien wieder als gerade Linien

Bild 66.

abgebildet werden, gelten aber nur für Linsen, bei denen die Dicke klein gegen den Durchmesser und den Krümmungsradius ist und für Strahlen, die in geringer Entfernung von der Linsenachse verlaufen. Für größere Dicken und endliche Krümmungen treten bei einfachen Linsen so starke Fehler auf, daß eine Erkennung von Einzelheiten im Bilde höchstens in unmittelbarer Nähe der Achse bei Beleuchtung mit monochromatischem Licht möglich ist. Für stärkere Vergrößerungen wird deshalb an Stelle der einfachen Linse eine Kombination mehrerer, ein Mikroskop, benutzt. Die grundsätzliche Wirkungsweise läßt sich, soweit Bildgröße und -Lage in Betracht kommt, auf die Abbildung durch zwei Linsen zurückführen, von denen die eine, dem Gegenstand zu gelegene, als Objektiv (O_1), die zweite als Augenlinse oder Okular (O_2) bezeichnet wird (Bild 66). Von dem Gegenstande a, dessen Abstand vom Objektiv um so kleiner ist, je stärker die Vergrößerung des Objektivs, je kleiner also seine Brennweite ist, wird ein vergrößertes Bild A entworfen, von welchem nun durch das Okular ein noch stärker vergrößertes virtuelles Bild in der deutlichen Sehweite erzeugt wird. Objektiv wie Okular bestehen im all-

gemeinen aus mehreren Linsen. Die Theorie zeigt ebenso wie die Versuche, daß die Vergrößerung keineswegs beliebig weit getrieben werden kann. Da bei einigermaßen starken Mikroskopen die wirkliche Größe der abgebildeten Einzelheiten des Gegenstandes bereits in die Größenordnung der Wellenlänge des Lichtes reicht, so darf man nicht mehr die Ausbreitung der Lichtstrahlen als streng geradlinig betrachten. Da man mit unbewaffnetem Auge in normaler Sehweite noch zwei Punkte trennen kann, die im Abstande von 0,06 mm voneinander liegen, so würde bei einer 500fachen Vergrößerung die entsprechende Punktentfernung im Gegenstande 0,12 μ sein, die noch erkannt werden könnte. Es zeigt sich, daß die kleinste Entfernung, welche ein fehlerfreies Mikroskopobjektiv bei geeigneter schiefer Beleuchtung mit kurzwelligstem sichtbarem Licht noch aufzulösen vermag, die gleiche Größe aufweist. Mit Rücksicht darauf, daß das Auflösungsvermögen des Auges bei unscharf begrenzten Objekten den Wert von 50″ nicht erreicht, wird man die lineare Vergrößerung

Bild 67.



eines Mikroskops bis auf etwa 700fach steigern können. Bei stärkerer Vergrößerung wird zwar eine bequemere Wahrnehmung von Einzelheiten bewirkt, aber es werden keine neuen Details sichtbar; man spricht in diesem Falle von leerer Vergrößerung oder Übervergrößerung.

Ähnliche Überlegungen führen auch zu einer Grenze der Leistungsfähigkeit der Fernrohre. Bei diesen wird durch das Objektiv O_1 ein umgekehrtes, verkleinertes, reelles Bild a erzeugt, welches durch das Okular O_2 (Bild 67) in ein vergrößertes virtuelles Bild verwandelt wird, welches nun dem Auge dargeboten wird. Das Auflösungsvermögen eines Fernrohres hängt im wesentlichen, fehlerfreie Abbildung vorausgesetzt, von dem Objektivdurchmesser ab. Wird der Radius r des Objektivs in Millimetern gemessen, so ist der Winkelabstand φ zweier Punkte, der noch aufgelöst werden kann, gegeben durch

$$\varphi = \frac{1{,}17'}{r}.$$

Der Winkel, unter dem zwei entfernte Gegenstände gesehen werden, wird durch das Fernrohr vergrößert; der Winkel φ erscheint also dem Auge in der Größe $\varphi \cdot v$, wenn v die Vergrößerung des Fernrohres be-

zeichnet, die durch das Verhältnis der Brennweiten von Objektiv und Okular gegeben ist. Dieser vergrößerte Winkel $\varphi \cdot v$ darf höchstens gleich dem physiologischen Grenzwinkel sein, also

$$\varepsilon \geqq \varphi \cdot v,$$

woraus folgt

$$\varepsilon \geqq \frac{1{,}17'}{r} \cdot v.$$

Setzt man näherungsweise $\varepsilon = 0{,}8'$, so wird die Grenze für r

$$r = \frac{1{,}17'}{0{,}8'} \cdot v = 1{,}46\ v.$$

Der Objektivdurchmesser muß also, wenn die Auflösungsfähigkeit eines Fernrohres voll ausgenutzt werden soll, mit der Vergrößerung wachsen. Bei den üblichen Handfernrohren mit 6—12facher Vergrößerung ist diese Bedingung erfüllt, doch ergibt sich aus der praktisch anzunehmenden Grenze von etwa 600 mm Radius für den Objektivdurchmesser eine Grenzvergrößerung von etwa 400, die jedoch ebenfalls wegen der bequemeren Beobachtung und der unvermeidlichen Abbildungsfehler der Objektive und der aus ihnen sich ergebenden Bilderverschlechterung noch auf 800—1000 erhöht werden kann.

Den Betrachtungen für das Fernrohr ist eine Wellenlänge von 0,00056 mm zugrunde gelegt, die dem Empfindlichkeitsmaximum des Auges entspricht. In entsprechender Weise lassen sich diese Überlegungen auch auf das Auge als optisches Instrument selbst übertragen, doch muß berücksichtigt werden, daß infolge der Einbettung der Augenpupille in ein Medium von höherem Brechungsvermögen die Wellenlänge verkleinert wird, so daß bei 2 mm Pupillendurchmesser die Auflösungsgrenze des Auges

$$\varphi = 0{,}84'$$

ergibt, während bei größerem Pupillendurchmesser entsprechend kleinere Werte folgen. Wenn trotzdem auch für letztere die Auflösungsfähigkeit, gegeben durch den physiologischen Grenzwinkel, nicht abnimmt, so ist dies nur dadurch zu erklären, daß die Auflösungsfähigkeit des Auges durch den Bau der Netzhaut bedingt wird. Andererseits folgt hieraus, daß eine Verkleinerung des Bündelquerschnittes durch Vorsetzen einer kleinen kreisförmigen Blende, wodurch zwar die Abbildungsfehler des Auges vermindert werden können, doch nicht eine schärfere Abbildung ergibt, da bereits bei 1 mm Blendendurchmesser der Durchmesser des Beugungsscheibchens auf etwa 2′ vergrößert wird, d. h. der Durchmesser des Lichtscheibchens, das wegen der Abweichung vom gradlinigen Strahlengange entsteht, größer wird als derjenige eines Netzhautelementes.

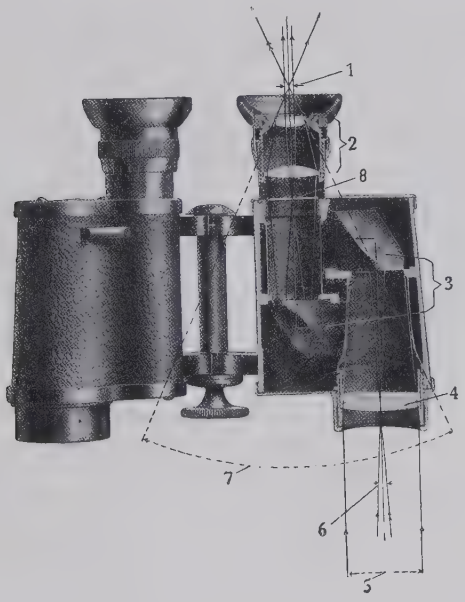
Zusammenfassend gilt also: Sowohl für Fernrohr als auch Mikroskope ist der kleinste noch auflösbare Gesichtswinkel etwa 0,15″.

§. 42. Die binokularen Instrumente.

Die binokularen Instrumente, — hierbei sind sowohl Kombinationen von Mikroskopen wie von Fernrohren zu berücksichtigen — können nach den Ausführungen des vorstehenden Abschnittes einerseits infolge der Fernrohr- oder Mikroskopvergrößerung eine Erhöhung des Breitenwahrnehmungsvermögens, andererseits infolge veränderten „Augenabstandes" eine verstärkte Tiefenwirkung ergeben.

In Bild 64 ist bereits die Wirkung eines falschen Beobachtungsabstandes angedeutet. Ganz ähnlich aber, und zwar im Sinne von Bild 64b wirkt die Fernrohrvergrößerung. Bei der Vergrößerung der

Bild 68.



Breitendimensionen wird die Tiefenerstreckung nicht in gleichem Maße vergrößert und das Bild wird unähnlich. Durch ein gewöhnliches binokulares Fernrohr betrachtet, erscheinen die Tiefenmaße stark verkürzt. Ein besonders auffallendes Bild ergibt sich, wenn man mit einem Doppelglase eine Eisenbahnstrecke entlang sieht: die unvermeidlichen kleinen Knicke und Senkungen der Schienen erscheinen gegenüber den verkürzten Tiefenabmessungen äußerst ausgeprägt. Durch ein einfaches Spiegelstereoskop gesehen, erscheinen im Gegensatz dazu die Tiefendimensionen vergrößert, während die Breitenwerte unverändert erhalten bleiben. Sieht man von der bereits beim einäugigen Sehen auftretenden Tiefenempfindung ab, so läßt sich demnach durch geeignete Wahl von Vergrößerung und

Augenabstand das Verhältnis von Tiefen- zu Breitenabmessungen in bestimmten Grenzen beliebig einstellen. Bild 68 stellt ein modernes binokulares Fernrohr (Prismenglas) dar, bei dem die den Augenabstand vergrößernde Spiegelanordnung durch ein Prismensystem ersetzt ist. Die durch das Objektiv 4 eintretenden Strahlen werden durch die Porrosche Prismenanordnung 3 parallel verschoben und treten dann in das Okularsystem 2 ein. Durch das vom Okular erzeugte Bild 1 der Objektivöffnung 5, die Austrittspupille, gehen alle Strahlen, die in das Objektiv eintreten. Befindet sich also die Augenpupille am Orte der Austrittspupille 1, so werden, falls der Durchmesser ϱ der Augenpupille größer ist als der Durchmesser d der Austrittspupille, alle Strahlen auch in das Auge eintreten. Im anderen Falle ($d > \varrho$) begrenzt die Augenpupille das eintretende Strahlenbündel. Erscheint ein Gegenstand direkt gesehen unter dem Winkel 6, so wird dieser, und damit die Breitenmaße all-

Bild 69.

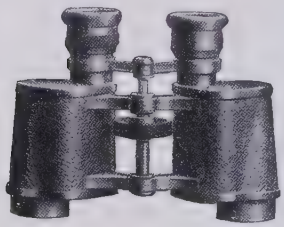


Bild 70.

gemein, gemäß der Fernrohrvergrößerung vergrößert, so daß die gleichen Strahlen hinter dem Okular den Winkel 7 bilden.

Die eingefügte Prismenkombination vergrößert gleichzeitig den Augenabstand und verursacht damit eine Erhöhung des binokularen Tiefenunterscheidungsvermögens. Ist der wahre Augenabstand b_0, der Abstand der Mitten der Objektive b, so wird der Quotient $\frac{b}{b_0}$ als spezifische Plastik, der Ausdruck $\frac{b}{b_0} \cdot v$, wobei v die Fernrohrvergrößerung ist, als totale Plastik bezeichnet. Während nun für die Naturbetrachtung meist eine erhöhte Plastik erwünscht ist, der Ausdruck $\frac{b}{b_0}$ also meist größer als Eins gewählt wird, würde für Theatergläser bei erhöhter spezifischer Plastik der Kontrast zwischen den ebenen Kulissen und der Körperlichkeit der Darsteller noch stärker hervortreten; man wählt für diesen Zweck eine verminderte spezifische Plastik, wie auch aus den Abb. 69 und 70 hervorgeht, von denen 69 ein Feldglas mit erhöhter Plastik, 70 ein Theaterglas mit verminderter Plastik darstellt.

Bei den binokularen Mikroskopen sind zwei verschiedene Gruppen zu unterscheiden und zwar Instrumente, bei denen die beiden Augen des Beobachters das gleiche Objekt mikroskopisch betrachten, und Mikroskope, die dasselbe Bild verschiedenen Beobachtern vorzuführen gestatten. Ein richtiger stereoskopischer Effekt wird auch bei den Instrumenten der ersten Art nicht erzielt, da das vom gleichen Objektiv erzeugte Bild beiden Augen gleich erscheint. Doch kann, wenigstens bei schwachen Vergrößerungen, ein räumlicher Eindruck hervorgerufen werden, wenn die Okulare nicht genau mit den beiden Augen des Beobachters zentriert sind. Es tritt dann eine geringe Verschiebung der beiden Bilder gegeneinander auf, die bei zu kurzem Okularabstand den richtigen stereoskopischen Effekt erzeugt, während bei zu weitem Okularabstand pseudoskopische Wirkung auftritt, Erhabenes vertieft und Vertiefungen erhaben erscheinen.

Nach Jentsch ergeben sich aber bei Benutzung eines binokularen Mikroskopes noch andere Vorteile. Der Wechsel der Aufmerksamkeit, die das Gehirn bald dem einen und bald dem andern Auge zuwendet, die Ergänzung der Leistung beider Augen, insofern als Unvollkommenheiten des einen Auges durch das andere ausgeglichen werden, und endlich die binokulare Reizsummation (S. 126) verursachen es, daß beim binokularen Mikroskop mehr Einzelheiten sichtbar werden, als beim monokularen. Auf die größere Lebhaftigkeit des Eindrucks beim binokularen Sehen hatte schon Hering hingewiesen. Ein zahlenmäßiger Ausdruck für diese Verbesserung wird, zumal bei der häufig vorhandenen Verschiedenheit beider Augen, kaum möglich sein, weil sekundär bei einäugigen Beobachtungen auch die unnatürliche einseitige Beanspruchung einwirkt, namentlich dann, wenn das unbenutzte Auge, wie es bei ungeübten Beobachtern häufig geschieht, zugekniffen wird.

§ 43. Stereoskopische Messverfahren.

Die stereoskopischen Meßmethoden haben eine sehr große Verbreitung gefunden. Zunächst sind die binokularen Fernrohre für Beobachtungszwecke ausgebaut worden. Bei geeigneter Prismenstellung ist eine spez. Plastik von mehr als 10 bei Scherenfernrohren erreicht worden; dann aber ist der stereoskopische Effekt in mannigfaltiger Weise zu Meßzwecken benutzt worden. Bringt man in den Bildebenen des binokularen Fernrohres (8 in Bild 68) Marken an, deren auf den Netzhäuten entworfene Bilder miteinander verschmelzen, so läßt sich an Hand dieser „Meilensteine“ eine Bestimmung der Entfernung durchführen. Ist der Abstand zweier Marken genau gleich dem Augenabstand, so wird der Ort des zugehörigen räumlichen Bildes ins Unendliche verlegt; mit abnehmen-

dem Abstand zusammengehöriger Marken vermindert sich die scheinbare Entfernung. Es ist leicht nachzuweisen, daß der kleinste noch meßbare Entfernungsunterschied d, der bei diesen Messungen infolge des Baues der Netzhaut noch bemerkbar ist, durch die Vergrößerung v, die spezifische Plastik B und die absolute Entfernung e des Gegenstandes gegeben ist und zwar durch (vgl. S. 105).

$$d = \frac{e^2 \cdot \varepsilon}{b_0 \cdot B \cdot v}$$

oder, wenn an Stelle von B sein Wert $\frac{b}{b_0}$ eingesetzt wird und für den physiologischen Grenzwinkel ε der Wert 10″ gewählt wird.

$$d = \frac{e^2}{b \cdot v \cdot 20000}$$

Vergleichsweise sind für Entfernungsmesser verschiedener Art die Fehlerwerte in der Tabelle angegeben.

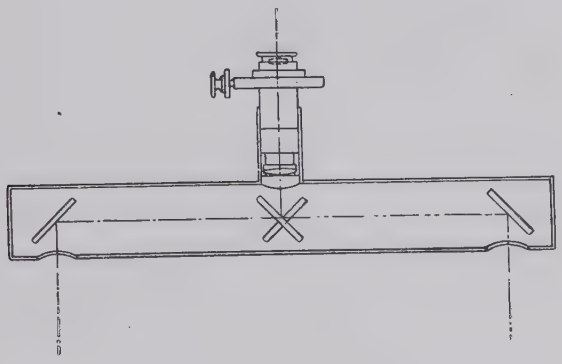
Basis b Vergröß. v.	0,70 m 10	1,00 m 15	2,00 m 20	4,00 m 20
Entfernung	d	d	d	d
500	2,57	1,20	0,45	0,23
1 000	7,14	3,33	1,25	0,67
1 500	15,07	7,50	2,81	1,50
2 000	28,57	13,33	5,00	2,67
3 000	64,28	30,00	11,25	6,00
4 000	114,28	53,33	20,00	10,67
5 000	178,57	83,33	31,25	16,67
6 000	257,14	120,00	45,00	24,00
7 000	350,00	163,33	61,25	32,67
8 000	457,14	213,33	80,00	42,67
9 000	578,57	270,00	101,25	54,00
10 000	714,28	333,33	125,00	66,67

Diese Genauigkeitswerte für die Entfernungsmessung können jedoch nur in den günstigsten Fällen erreicht werden. Meist wird der physiologische Fehler bereits größer ausfallen. In Verbindung mit den Apparatefehlern infolge mechanischer und Wärmebeanspruchung wird für den praktischen Fehler der vierfache Wert anzunehmen sein. Bei den zahlreichen Versuchen, die während der Kriegszeit mit den militärischen Zwecken dienenden Entfernungsmessern ausgeführt worden sind, hat sich übrigens gezeigt, daß die Fähigkeit stereoskopischen Sehens durchaus nicht als allgemein vorhanden angenommen werden kann. Nur bei einem geringen Prozentsatz der Menschen ist die für das stereoskopische Sehen erforderliche Gleichmäßigkeit der beiden Augen vorhanden, wenigstens in dem Maße, wie es für die feineren Messungen erforderlich ist.

Für derartige Entfernungsmessungen auf Grund des räumlichen Sehens werden meist nicht feste Marken verwendet, sondern es wird der Abstand der in der Bildebene angebrachten Marken verändert, so daß die scheinbare Entfernung der Marke sich ändert. Die gleiche Wirkung kann auch erzielt werden durch eine geringe Winkelablenkung eines Bildes. Bei feststehenden Marken und der damit gegebenen Konvergenz der Augenachsen werden die Bilder durch Drehkeile oder ähnliche Vorrichtungen so lange gegeneinander verschoben, bis der zu messende Gegenstand unter gleichem Konvergenzwinkel erscheint.

Der zuerst von Groussillier gefaßte Gedanke, den beim binokularen Sehen auftretenden räumlichen Eindruck zu Messungen zu verwenden, ist, vielleicht auch infolge abfälliger Beurteilung durch v. Helmholtz, längere Zeit nicht zur Durchführung gekommen. Die ersten praktisch verwendeten Entfernungsmesser waren nicht Raumbildentfernungsmesser,

Bild 71.



sondern Schnittbild- oder Kehrbildentfernungsmesser, deren Bauart aus Bild 71 hervorgeht. Die an den äußeren Spiegeln reflektierten Strahlen gelangen zu den vor dem Beobachtungsfernrohr gekreuzten Spiegeln und treten nach Reflexion an diesen in das Fernrohr ein. Für einen im Unendlichen gelegenen Gegenstand sind die eintretenden Strahlen parallel und erzeugen im Fernrohr genau zusammenfallende Bilder. Je näher der Gegenstand dem Fernrohr liegt, desto größer ist der Neigungswinkel der eintretenden Strahlen und desto mehr sind die beiden in der Bildebene des Objektives entstehenden Bilder, die durch das Okular betrachtet werden, gegeneinander verschoben. Mißt man diese Verschiebung mit Hilfe eines Mikrometers, so läßt sich aus ihr die Entfernung berechnen. Bei neueren Instrumenten werden die Bilder dem Auge getrennt dargeboten und die Verschiebung der in einer scharfen Linie aneinandergrenzenden Bilder wird durch einen Drehkeil kompensiert, dessen Drehung

als Maß der Entfernung dient. Auch sonst weist die Optik Veränderungen gegenüber Bild 71 auf. Für die Fehler der Messung gilt die gleiche Formel, welche weiter oben für Raumbildentfernungsmesser abgeleitet ist.

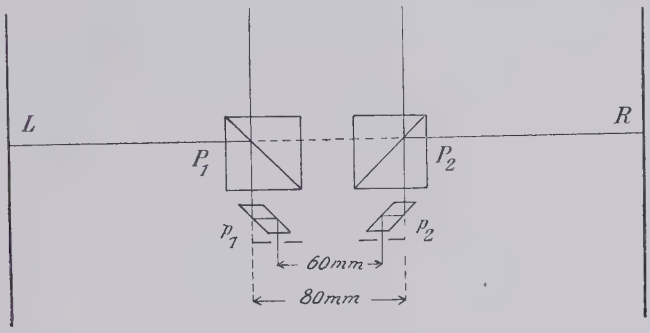
Die stereoskopischen Meßverfahren haben auch für andere Zwecke Verwendung gefunden. Es ist klar, daß der physiologische Fehler um so weniger gegenüber den Apparatefehlern in Frage kommt, je größer die Basis wird und daß deshalb das Verfahren auch für topographische Zwecke anwendbar ist. Aus zwei von verschiedenen Standpunkten aufgenommenen Aufnahmen lassen sich alle auf beiden Bildern sichtbaren Punkte ihrer Lage nach genau bestimmen, wenn die Entfernung der Aufnahmeorte und die Aufnahmerichtungen bekannt und die Brennweiten der Aufnahmeobjektive genau gleich sind. Eine bedeutende Erleichterung des photogrammetrischen Verfahrens ist es, wenn zur Auswertung bestimmt orientierte Aufnahmen benutzt werden, die zusammen ein stereoskopisches Bild ergeben, das dann mit Hilfe einer wanderndon Marke unmittelbar ausgemessen werden kann, wie es beim Stereographen geschieht. Während des Krieges sind große Landstrecken in Serbien auf diesem Wege kartiert worden und auch bei der Anlage von Bahnen hat das Verfahren ebensogute Dienste geleistet, wie bei der Vermessung der Kolonien.

Eine einfachere Weiterbildung des Stereoskops stellt der Pulfrichsche Stereokomparator dar. Bringt man in ein Stereoskop zwei vollkommen gleiche Bilder, so wird ein flächenhafter Eindruck entstehen. Zeigt aber eines der Bilder eine wenn auch nur geringfügige Abweichung, so muß sofort ein räumliches Bild auftreten. Somit bildet ein derartiger Stereokomparator ein geeignetes Hilfsmittel zur Feststellung der Echtheit von Wertpapieren und der Gleichheit von Maßstäben. Wolf hat beim Vergleich von Himmelsaufnahmen eine ganze Anzahl veränderlicher Fixsterne und einen Planeten auf diesem Wege entdecken können. Wählt man zwei Mondaufnahmen, die bei verschiedener Stellung des Mondes zur Erde gewonnen sind, so lassen sich bei dem auf mehrere tausend Kilometer vergrößerten Augenabstand selbst Messungen der Höhenunterschiede auf der Mondoberfläche ausführen.

Auch in der Röntgentechnik wird zur Bestimmung der räumlichen Lage irgendwelcher Gegenstände im Körper die stereoskopische Methode benutzt. Pulfrich beschreibt (1918) ein Raumbildmeßgerät, welches eine Verbindung eines Helmholtzschen und eines Wheatstoneschen Spiegelstereoskops darstellt. Bild 72 zeigt die Prismenanordnung des Betrachtungsapparates für das kleinere Modell. L und R sind die von zwei verschiedenen Punkten aus erhaltenen Röntgenaufnahmen, P_1 und P_2 Glaskörper, die aus rechtwinkligen Prismen verkittet sind. Bei jedem Würfel ist die Hypotenusenfläche eines Prismas halb durchlässig ver-

silbert, so daß man beim Einblick in die Prismen p_1 und p_2, deren Einblicksöffnungen dem Augenabstand entsprechen, einerseits die Röntgenaufnahmen, andererseits eine in der Blickrichtung hinter den Prismen befindliche Marke sieht, welche zur Ausmessung der Aufnahmen dient.

Bild 72.



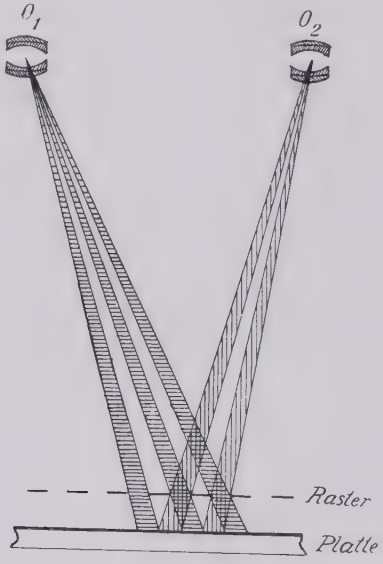
Wie Pulfrich angibt, kann man den aufgenommenen Körper selbst an die Stelle der wandernden Marke vor den Betrachtungsapparat bringen und zwar in genau die gleiche Lage, in der er zum Aufnahmeapparat gestanden hat. Auf den menschlichen Körper angewandt, würde die Möglichkeit geboten sein, gleichzeitig die Haut des Menschen und die dahinterliegenden Knochen oder Fremdkörper im Raumbild körperlich zu sehen.

§ 44. Objektive Wiedergabe stereoskopischer Bilder.

Bei den bisher beschriebenen Stereoskopen sind zwei verschiedene Bilder des gleichen Gegenstandes erforderlich, die durch eine optische Vorrichtung (Linsen, Prismen oder Spiegel) getrennt den Augen dargeboten werden. Das Bestreben, das stereoskopische Bild gleichzeitig mehreren Personen sichtbar zu machen, führte zur Ausarbeitung mehrerer Methoden, die sämtlich darauf hinauslaufen, durch geeignete Vorrichtungen die beiden auf einer Fläche entworfenen Einzelbilder getrennt den Augen zuzuführen. Eines der ersten Verfahren beruht darauf, die beiden Bilder in verschiedenen Farben auf die gleiche Fläche zu projizieren und sie durch farbige Brillen zu betrachten. Sind die Bilder rot und grün, so muß die Brille ein nur für rotes Licht und ein nur für grünes Licht durchlässiges Glas haben. Das rote Bild ist nur durch das grüne Glas, das grüne Bild nur durch das rote Glas sichtbar; beide zusammen ergeben ein neutral gefärbtes Bild (Verfahren von Rollmann und d'Almeida). Auf diese Weise ist es auch möglich, bei kinematographischen Vorführungen stereoskopische Bilder zu erzielen; es ist dabei nicht erforderlich, daß die komplementär gefärbten

Bilder gleichzeitig projiziert werden, es kann vielmehr auch eine schnelle zeitliche Aufeinanderfolge der Teilbilder gewählt werden. Störend wirkt dabei der Wettstreit der Sehfelder bei empfindlichen Augen. Auch auf anderem Wege ist von d'Almeida die Trennung der Bilder versucht worden. Läßt man die Bilder in zeitlichem Wechsel erscheinen und betrachtet sie durch eine drehbare Blendenscheibe, die das linke Auge abblendet, wenn das dem rechten Auge zugehörige Bild projiziert wird, und umgekehrt, so werden ebenfalls stereoskopische Wirkungen erzielt. Nur wenn die Blendscheibe mit der Filmtransportvorrichtung gekuppelt ist, kann aber der erforderliche Synchronismus erreicht werden.

Bild 73.



Anderton hat 1891 versucht, die Polarisation des Lichtes zur Trennung der Bilder zu verwenden. Bei dem natürlichen Licht erfolgen die Schwingungen der Aetherteilchen in schneller Aufeinanderfolge in allen zur Strahlrichtung senkrechten Richtungen. Sondert man durch geeignete Vorrichtungen (Polarisatoren) eine dieser Schwingungsrichtungen aus, so kann man zwar mit unbewaffnetem Auge keinen Unterschied des polarisierten Lichtes gegenüber dem natürlichen Licht erkennen, doch kann man es durch die gleichen Vorrichtungen in seiner Intensität beliebig verändern und bei bestimmter Stellung der Polarisatoren ganz auslöschen. Auch auf diesem Wege ist also eine Trennung der Teilbilder möglich, doch sind, um den Polarisationszustand des Lichtes bei der Zurückwerfung von dem Projektionsschirm unverändert zu erhalten, Schirme mit „metallisch“ reflektierender Oberfläche erforderlich, weil bei den

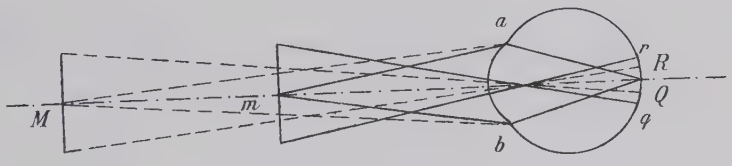
gewöhnlich verwendeten Schirmen das polarisierte Licht zum größten Teil wieder in natürliches Licht verwandelt wird.

Auch das bei der Farbenphotographie viel verwendete Raster ist zur Erzeugung stereoskopischer Bilder verwendet worden. Ducos du Hauron, Berthier, Estanave und Ives haben mit Hilfe von Rastern die Trennung der Bilder bewirkt. Befindet sich vor einer photographischen Platte in geringem Abstand ein Gitter aus durchsichtigen und undurchsichtigen Streifen, so werden die von zwei Objektiven O_1 und O_2 entworfenen Bilder (Bild 73) gerade die Platte ausfüllen und zwar so, daß das vom Objektiv O_1 entworfene, aus einzelnen Streifen bestehende Bild gerade die Plattenteile deckt, die für die vom Objektiv O_2 kommenden Strahlen durch die undurchsichtigen Rasterstreifen abgeblendet sind. Denkt man sich an Stelle der Objektive die Augen des Beobachters, so werden den Augen getrennte Bilder zugeführt, deren Unvollständigkeit bei hinreichend feinem Raster nicht wahrgenommen wird, ebensowenig, wie bei den Photographien in natürlichen Farben die einzelnen Farbflecke zum Bewußtsein kommen.

§ 45. Die Helligkeit optischer Instrumente.

Betrachtet man zunächst das Einzelauge und stellt die Frage, welche Helligkeit die Bilder äußerer Gegenstände im Auge aufweisen, so läßt sich zeigen, daß innerhalb weiter Grenzen die Helligkeit unabhängig von der Bildentfernung ist. Bleibt die Pupillenöffnung gleich groß, so wird,

Bild 74.

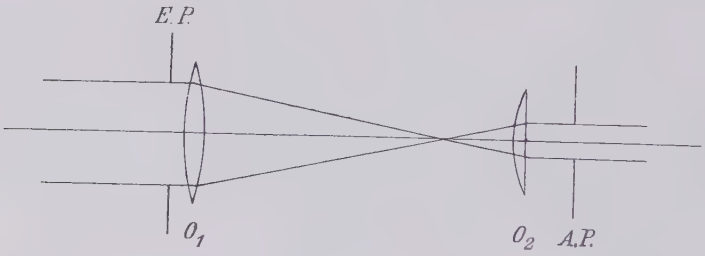


wie Bild 74 zeigt, bei Annäherung des Gegenstandes M zwar die von einem Flächenelement des Gegenstandes in das Auge gelangende Lichtmenge, die durch den Öffnungswinkel a M b gemessen wird, bei Lage m auf a m b vergrößert; der Lichtreiz verteilt sich dafür aber auf eine größere Fläche (r q gegen R Q), so daß die auf ein Netzhautelement wirkende Lichtmenge unabhängig von der Entfernung wird. Wird aber die Entfernung des Gegenstandes so groß oder der Gegenstand so klein (punktförmig), daß sein geometrisches Bild kleiner ist als die Fläche eines Netzhautelementes, so wird die Stärke des Reizes und damit die Helligkeitsempfindung mit zunehmender Entfernung abnehmen müssen.

Bringt man nun vor das Auge ein Fernrohr, so sind wieder bezüglich der Helligkeit der Bilder die beiden Fälle flächenhafter und punktförmiger Gegenstände zu unterscheiden. Sind die von einem Flächenelement eines ausgedehnten Körpers in das Objektiv des Fernrohrs gelangenden Strahlen parallel, was man ohne merklichen Fehler stets annehmen kann, so treten sie auch aus dem Okular unter sich parallel wieder aus und gehen sämtlich durch die Austrittspupille, die durch das vom Okular entworfene Bild der Objektivöffnung gegeben ist. Sie liegt bei astronomischen und terrestrischen Fernrohren hinter dem Okular und stellt sich, wenn man aus einiger Entfernung auf das gegen den Himmel gerichtete Fernrohr schaut, als helle, über dem Okular schwebende Kreisfläche dar (Bild 75).

Ist der Durchmesser dieses Kreises d, derjenige des Objektivs D, so ergibt sich für deren Verhältnis $\frac{D}{d}$ ein Wert, der die Vergrößerung v des Fernrohres darstellt. Nennt man den Durchmesser der Augenpupille δ,

Bild 75.



so würde die Intensität des unmittelbar von einem Flächenelement des beobachteten Körpers in das Auge eintretenden Lichtes bis auf einen konstanten Faktor gegeben sein durch die Fläche $\frac{\pi \delta^2}{4}$ der Pupillenöffnung, während durch das Fernrohr, vorausgesetzt, daß $d < \delta$ ist, die Lichtmenge $\frac{\pi D^2}{4}$ in das Auge gebracht wird. Ist der Gegenstand so klein (punktförmiges Objekt), daß auch bei Vergrößerung durch das Fernrohr das Bild nur ein Netzhautelement bedeckt, so wirkt also einmal die Lichtmenge $\frac{\pi \delta^2}{4}$, das andere Mal aber die größere Lichtmenge $\frac{\pi D^2}{4}$ ein, so daß, durch das Fernrohr gesehen, punktförmige Objekte (Sterne) heller erscheinen müssen, bei schwachem Licht überhaupt erst sichtbar werden, eine Tatsache, die leicht erwiesen werden kann. Selbst bei Benutzung eines nur 6—10fach vergrößernden Prismenglases ist man schon imstande,

bedeutend mehr Sterne am Nachthimmel zu erkennen als mit bloßem Auge. Die Steigerung der Helligkeit ist in diesem Falle $D^2 : \delta^2$, wächst also mit dem Quadrat des Objektivdurchmessers. Ist $d > \delta$, so wird nur ein Teil der Objektivöffnung ausgenutzt und die Steigerung der Helligkeit ist durch das Quadrat der Vergrößerung gegeben, weil entsprechend zu der verkleinerten Austrittspupille vom Durchmesser δ eine Eintrittspupille vom Durchmesser $\delta \cdot v$ gehört. Für astronomische Fernrohre wird, auch bei großen Öffnungen des Objektivs, stets der Fall $d < \delta$ anzunehmen sein, da selbst bei verhältnismäßig schwachen Vergrößerungen (z. B. $v = 50$) bei 4 mm Durchmesser der Augenpupille der Durchmesser des Objektivs schon 20 cm betragen müßte, wenn die ganze Pupille ausgefüllt sein soll.

Bei flächenhaften Gegenständen ist dagegen zu berücksichtigen, daß mit steigender Vergrößerung die Lichtmenge sich auf einen größeren Netzhautbezirk verteilt, daß also dem größeren Durchmesser des in das Objektiv eintretenden Lichtkegels auch eine größere Zahl der gereizten Netzhautelemente entspricht. Selbst wenn die Pupille vollständig ausgefüllt ist und man von den Lichtverlusten durch Reflexion an den Glasflächen und Absorption absieht, kann die Helligkeit eines flächenhaften, durch ein Fernrohr betrachteten Gegenstandes höchstens gleich der Helligkeit des direkt betrachteten Dinges sein. Meist, vor allem bei Beobachtungen in der Dämmerung, wenn die Pupille größere Durchmesser aufweist, wird sogar ein Helligkeitsverlust festzustellen sein, der dadurch bedingt ist, daß die Austrittspupille kleiner wird als die Augenpupille. Die Helligkeit H_0 des unmittelbar betrachteten zu derjenigen H des durch ein Fernrohr gesehenen Gegenstandes wird aber gleich dem Verhältnis der Lichtbündelquerschnitte sein, die dem Auge zugeführt werden, demnach:

$$\frac{H}{H_0} = \frac{d^2}{\delta^2} = \frac{D^2}{v^2 \cdot \delta^2}.$$

Bei gleichbleibendem Objektivdurchmesser nimmt also die Helligkeit H mit dem Quadrat der Vergrößerung ab. Gewöhnlich wird als Maß der Helligkeit eines Fernrohres das Quadrat des in Millimetern gemessenen Durchmessers der Austrittspupille angegeben. Bei sog. Galileischen Fernrohren, deren Okular aus einer Zerstreuungslinse besteht, liegt die Austrittspupille zwischen Objektiv und Okular, so daß das Auge nicht an ihren Ort gebracht werden kann. Die Helligkeit bleibt infolgedessen nicht über den ganzen Bereich des überblickten Gesichtsfeldes gleichmäßig, sondern nimmt nach dem Rande zu ab. Nur ein je nach Bauart des Galileiglases größerer oder kleinerer Bezirk in der Mitte des Gesichtsfeldes weist gleichmäßige Helligkeit auf. Dessen Größe hängt aber auch noch wesentlich von der Größe der Augenpupille ab. Es ist dem-

nach, im Gegensatz zu astronomischen und terrestrischen Fernrohren, bei den Galileischen Gläsern nicht möglich, eine bestimmte, für die ganze Ausdehnung des Bildes geltende Helligkeit anzugeben, ebenso wie auch die Größe des zu übersehenden Winkelbereiches von der Eigenhelligkeit der Körper und dem Pupillendurchmesser des Auges abhängig ist.

Für die Helligkeit der Mikroskope lassen sich ähnliche Betrachtungen durchführen; auch sie führen zu dem Ergebnis, daß die Helligkeit des Bildes durch den Durchmesser der Austrittspupille gegeben ist und daß sie mit dem Quadrat der Vergrößerung abnimmt. Auch durch diese Verminderung der Helligkeit mit steigender Vergrößerung wird also eine Grenze für die Leistungsfähigkeit von Fernrohren und Mikroskopen gegeben, da die Vergrößerung des Objektivdurchmessers bei Fernrohren, die Vergrößerung der Helligkeit der Lichtquellen für Mikroskope durch die technischen Schwierigkeiten begrenzt ist.

Die Verwendung binokularer Instrumente gibt aber auch bezüglich der Helligkeit gewisse Vorteile gegenüber solchen für einäugige Betrachtung. Schon bei helladaptierten Augen läßt sich eine geringe Helligkeitssteigerung bei binokularer Betrachtung nachweisen, die mit Eintritt der Dunkeladaptation deutlicher wird. Nach etwa viertelstündiger Adaptation trennen sich die die Empfindlichkeit bei monokularem und binokularem Sehen darstellenden Kurven deutlich. Piper zeigte, daß bei zwei weißen Flächen, deren eine nur dem einen Auge, deren andere beiden Augen sichtbar war, die Helligkeit der ersten Fläche im Mittel den 1,6—1,7fachen Betrag der Helligkeit, bei sehr geringen Intensitäten sogar nahezu den doppelten Betrag der objektiven Helligkeit aufweisen mußte, um mit der binokular betrachteten in gleicher Helligkeit zu erscheinen.

§ 46. Die Theorien des räumlichen Sehens.

Die bisher angeführten Tatsachen und Gesetzmäßigkeiten, die beim Zustandekommen eines Bildes der Außenwelt, sei es nun beim einäugigen oder zweiäugigen Sehen, in Betracht kommen, geben noch keine Beantwortung der Frage, weshalb dem auf den Netzhautelementen entworfenen objektiv nachweisbaren Bilde, vielmehr der durch das Bild bedingten Empfindung, Dinge und Vorgänge in der Außenwelt zugeordnet werden, und weshalb in dieser Zuordnung Richtung, Größe und räumliche Anordnung den unseren durch Tastsinn erworbenen Erfahrungen entprechen? Man könnte von der Beantwortung dieser Frage, solange es sich um die Feststellung rein physikalischer Zusammenhänge handelt, absehen, doch zeigt sich bei einigermaßen tiefgehender Untersuchung des Zusammenhanges zwischen den Gesichtsempfindungen und den durch den Tastsinn

oder auf anderem Wege ermittelten Ursachen der Empfindung zuweilen ein Mißverhältnis, welches dazu zwingt, auch die physiologischen, teilweise gar psychischen Vorgänge in den Kreis der Betrachtung zu ziehen. Schon die eine Tatsache, daß die nach erheblicher körperlicher Anstrengung vorhandene Reizung des Sehnerven zu Lichtempfindungen Veranlassung gibt, die als außerhalb des Körpers vorhandene leuchtende Punkte und Figuren gedeutet werden, welche sich im Rhythmus des Herzschlages bewegen, zeigt, daß wir Sinnestäuschungen unterworfen sind, die bei einer Deutung der Sinnesempfindungen beachtet werden müssen.

Die wesentlichsten Ansichten über das Zustandekommen der Raumwahrnehmung lassen sich in zwei verschiedenen Auffassungsformen zusammenfassen, deren eine als die nativistische, deren andere als empiristische zu bezeichnen ist. Die erste Richtung, welche als Hauptverfechter Hering aufweist, setzt eine angeborene Raumempfindung voraus, derart, daß die Sehsubstanz infolge der ihr angeborenen Eigenschaften jeden äußeren Reiz sofort in Farb- und Raumempfindung umsetzt, ohne daß irgendeine bewußte oder unbewußte gedankenmäßige Verwertung irgendwelcher Erfahrungen mitspricht. Jedem Netzhautelement eines Auges ist ein bestimmtes des anderen zugeordnet und alle Außenpunkte, die auf derartige zugeordneten Elementen abgebildet werden, besitzen ein „Lokalzeichen", auf Grund dessen sie in einer bestimmten Sehrichtung erscheinen. Alle gleichzeitig auf zusammengehörigen (identischen) Netzhautstellen abgebildeten Punkte werden einfach gesehen und gehören der Kernfläche an. Die auf nicht identischen Netzhautstellen abgebildeten Punkte weisen eine Querdisparation auf, die ein Doppeltsehen bedingt. Die Größe und Art der Querdisparation, gekreuzte in Fällen, wo die gesehenen Außenpunkte zwischen der Kernfläche des Sehraumes und dem Auge liegen, ungekreuzte, wenn sie hinter der Kernfläche liegen, führt zwangsmäßig zum Eindruck der Nähe oder Ferne. Nach Ansicht Herings „lehrt jeder Blick in die Außenwelt, daß fast alle Dinge in ihrer Erscheinung andere Raumverhältnisse haben als in der Wirklichkeit, und wenn man gleich weiß, daß die fernen Bäume einer Allee dieselbe Größe und Distanz haben wie die näheren, so sieht man sie doch kleiner und näher aneinandergerückt. Unsere Anschauung der Außenwelt deckt fast nie die Wirklichkeit, weil die Tiefenauslegung des Netzhautbildes stets eine unvollkommene ist und auf halbem Wege zwischen dem flachen Netzhautbild und der körperlichen Wirklichkeit stehen bleibt. Unsere Anschauung ist gleichsam ein Relief, das zwischen Planbild und voller Körperlichkeit die Mitte hält. Daraus folgt, daß höchstens einige wenige Punkte am richtigen Orte erscheinen können." In der Tat ist bezüglich der Wahrnehmung der Tiefenunterschiede die Nähe der Ferne gegenüber bevorzugt, doch sind alle Tiefenunterschiede

nur relative. Um ein wirkliches Tiefenmaß zu erhalten, muß der Ort des eigenen Körpers als Ausgangspunkt der Tiefenlokalisation gewählt werden.

Die Bedeutung des Einflusses von Erfahrungen, auf welche die besonders von Helmholtz und Wundt vertretene empiristische Anschauung sich stützt, wird auch von Hering nicht geleugnet. Helmholtz führt gegen die nativistische Anschauung an, daß gerade die von deren Verfechtern angenommene Einwirkung der Erfahrung auf die ursprünglichen Raumempfindungen der Unmittelbarkeit der Empfindungen widerspricht. Er betrachtet deshalb die meisten Raumanschauungen als ein Produkt der Erfahrung und Einübung, weil „nichts in unseren Sinneswahrnehmungen als Empfindung anerkannt werden kann, was durch Momente, die nachweisbar die Erfahrung gegeben hat, in sein Gegenteil verkehrt werden kann." Die Schwierigkeit der Entscheidung dieser Fragen liegt zum Teil darin, daß die Beobachtung subjektiver Empfindungen äußerst schwer ist, zumal fast in allen Sinneseindrücken eine solche Mannigfaltigkeit vorhanden ist, daß der Gesamteindruck kaum bewertet wird. Die Aufmerksamkeit wird nur auf den Teil der Empfindungen gelenkt, die eine Bedeutung für die Erkennbarkeit äußerer Objekte haben, wobei zwischen der reinen Empfindung und dem bewußten Erfassen derselben häufig noch unbewußte Schlüsse eingeschaltet werden. Die Wahrnehmung der Richtung wird zurückgeführt auf die Beurteilung des Ortes des Netzhautbildes und der Augenstellung, die Wahrnehmung der körperlichen Form und damit der Tiefenabmessung wird abgeleitet aus der Kombination der perspektivischen Bilder und der Akkommodationswirkung, wobei ungewohnte Art der Beobachtung zu falscher Beurteilung des Netzhautbildes wegen mangelnder Erfahrung führen kann. Für die naturwissenschaftliche Forschung wird es in den weitaus meisten Fällen von Vorteil sein, der Helmholtzschen Anschauungsweise sich zu bedienen, zumal die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen objektiver Reizung und subjektiver Empfindung noch nicht vollständig genug ist, um eine bündige Entscheidung für eine der Anschauungen treffen zu können. Auch vom Standpunkt der empiristischen Betrachtungsweise ist eine Erklärung der Unvollkommenheit des Anschauungsbildes ohne Schwierigkeiten möglich. In größerer Nähe ist die Mannigfaltigkeit des Netzhautbildes und die Reichhaltigkeit der Einzelheiten so groß, die Kontrolle durch den Tastsinn so leicht möglich, daß infolge zahlreicher Anknüpfungspunkte für die Erfahrung Größen- und Tiefenverhältnisse besser beurteilt werden können als in größerer Entfernung, wo der infolge des Netzhautbaues abzuleitende Fehler der Tiefenwahrnehmung bald so groß wird (s. S. 106), daß das binokulare Tiefenunterscheidungsvermögen versagt und Entfernungsschätzungen nur mehr auf Grund sekundärer Lokali-

sationszeichen erfolgen können. Es ist bei dieser Anschauungsweise leicht verständlich, daß durch Übung, also Erwerbung ausreichender Erfahrung, Entfernungsschätzungen mit steigender Sicherheit auch in den Raumgebieten ausgeführt werden, die jenseits der Grenze des stereoskopischen Sehens liegen. Auch die Beobachtungen an Blindgeborenen zeigen, daß erst unter dem Einfluß von Erfahrungen die räumliche Auswertung des Netzhautbildes möglich wird, wenn auch andererseits die Beobachtungen von Schlodtmann dafür sprechen, daß die „Richtungswerte" bereits angeboren sind, da die Lichterscheinung, welche bei Blindgeborenen durch Druck hervorgerufen werden kann, in dieselben Richtungen verlegt werden, in welche die optische Erfahrung den Ausgangspunkt von Lichtreizen verlegt, die dieselbe Stelle der Netzhaut treffen. Um aber zu einer Entscheidung über die Richtigkeit der Anschauungen zu gelangen, ist noch eine große Zahl sorgfältig und objektiv durchgeführter Beobachtungen erforderlich, während metaphysische Spekulationen nur zu einer Verwirrung der Begriffe führen können. Wichtige Anhaltspunkte für die Einwirkung psychischer Vorgänge geben die Sinnestäuschungen, die aber mehr für die empirische wie für die nativistische Theorie zu sprechen scheinen. Eine weitere Ausführung der vom erkenntnistheoretischen Standpunkt wichtigen Frage muß wegen des Platzmangels unterbleiben, doch sei hier noch besonders auf die Darlegungen in H. v. Helmholtz' Handbuch der physiologischen Optik, Bd. 3, 3. Aufl., Hamburg und Leipzig 1910 und E. Hering, „Beiträge zur Physiologie", Leipzig 1861—1864, sowie Herings weitere Schriften: „Die Lehre vom binokularen Sehen", Leipzig 1868, und „Lehre vom Raumsinn des Auges" in Hermanns Handbuch der Physiologie, Bd. 3, 1880, hingewiesen.

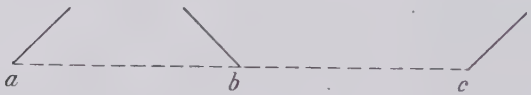
Abschnitt VIII.

Optische Täuschungen.

§ 47. Täuschungen des Augenmaßes.

In Abschnitt IV ist bereits darauf hingewiesen worden, daß die durch Gesichtsbilder übermittelten Wahrnehmungen nicht in allen Einzelheiten richtig sind, sondern daß je nach den äußeren Bedingungen Fehler auftreten, die aus dem Bau der Netzhaut oder des optischen Teiles des Auges zwanglos erklärt werden können. Sind jedoch die äußeren Umstände ungewöhnlich oder werden durch gewisse Zusätze Ideenverbindungen ausgelöst, die dem primären Eindruck widersprechen, so treten

Bild 76.

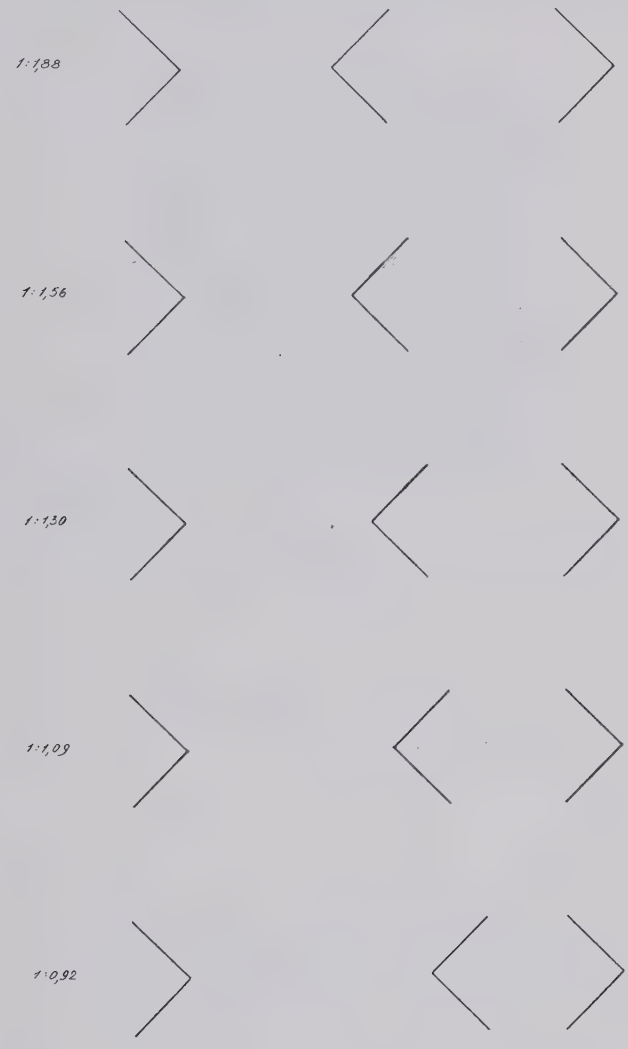


noch weitere Unterschiede zwischen dem Gegenstande und seinem Gesichtsbilde auf, die nicht allein auf den physiologischen Bau des Auges zurückgeführt werden können.

Eine wichtige Regel für einen Teil der in Betracht kommenden Erscheinungen läßt sich in folgender Weise formulieren: Deutlich erkennbare Unterschiede erscheinen bei allen Sinneswahrnehmungen größer als undeutlich oder andeutungsweise erkennbare Unterschiede von gleicher objektiver Größe. Deshalb erscheint eine ungeteilte Strecke stets kleiner als eine geteilte, eine Tatsache, die sich auch bei flächenhaften Objekten nachweisen läßt. Teilt man eine horizontale Strecke von 40—50 mm Länge zunächst in zwei gleiche Teile und dann die eine Hälfte in etwa 8—10 Teile, so erscheint die geteilte Hälfte deutlich größer, wobei die schon an anderer Stelle beschriebene Bevorzugung einer Teilstrecke bei Beobachtung mit dem rechten oder linken Auge noch zu berücksichtigen ist. Noch deutlicher treten die Erscheinungen hervor, wenn man ein Quadrat durch zu einer Seite parallele Linien unterteilt. In Richtung

der unterteilenden Linien erscheint dann das Quadrat zusammengedrückt. Eine Reihe bekannter Beispiele aus dem täglichen Leben läßt sich hier anführen. Längsgestreifte Kleidungsstücke lassen den Körper breiter, quergestreifte höher erscheinen.

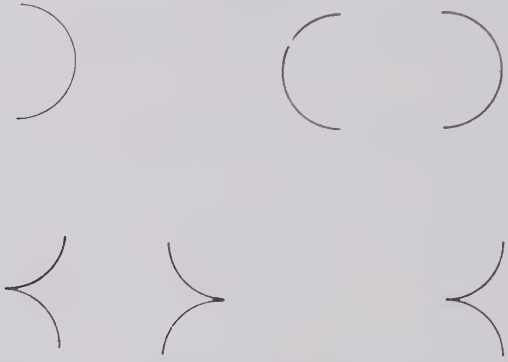
Bild 77.



Auerbach hat eine besondere Art der Täuschung bezüglich der Längen zweier Abschnitte genauer untersucht, die auch als Müller-Lyersche oder Brentanosche Täuschung bekannt ist. Die Schätzung der Abstände dreier Punkte erfolgt im allgemeinen mit großer Sicherheit, so daß die Lage des mittelsten auf wenige Zehntelmillimeter richtig an-

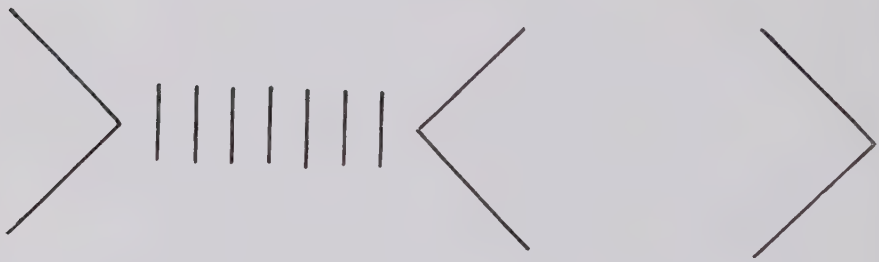
gegeben wird, wenn man fordert, daß er die Verbindungslinie der äußeren Punkte teilen soll. Zieht man aber von den in bezug auf ihre Lage zu beurteilenden Punkten Striche unter verschiedenen Richtungen (Bild 76) oder legt durch die Punkte Strichsysteme anderer Art, so wird die Beurteilung ihres Abstandes so erschwert, daß Fehler von mehr als einem Zentimeter bei etwa 5 cm Größe der Einzelintervalle die Regel sind. Die

Bild 78.



Stärke der Täuschung ist abhängig von der Lage und Länge der Striche (Bild 77 und 78). Die in Bild 76 gegebenen Teilverhältnisse lassen bereits erkennen, daß scheinbare Gleichheit der Intervalle bei den gezeichneten Strichlängen der Schenkel für ein Abstandsverhältnis zwischen

Bild 79.



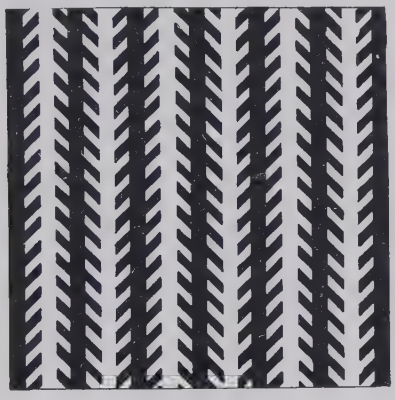
1,30 und 1,56 vorhanden ist. Nach Auerbach gibt bei 50 mm Abschnittslänge in Abhängigkeit von der Schenkellänge:

Schenkellänge	Geschätztes Verhältnis wirklich gleicher Abschnitte
5 mm	1,20 mm
7,5 „	1,26 „
10 „	1,35 „
13 „	1,45 „
16 „	1,49 „
20 „	1,55 „

Verstärken läßt sich die Wirkung noch, wenn man die Brentanosche Täuschung mit der an erster Stelle erwähnten Teilungstäuschung verbindet, wie Bild 79 zeigt. Der rechte Abschnitt erscheint bei unbefangener Beobachtung noch wesentlich größer als der linke, obwohl der linke 1,5mal größer ist als der rechte.

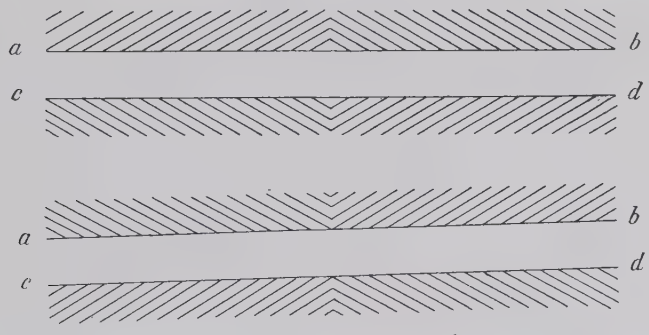
Bei einer anderen Reihe von Täuschungen spielt die Augenbewegung eine wichtige Rolle. In dem Zöllnerschen Muster (Bild 80) erscheinen

Bild 80.



die senkrechten schwarzen Linien gegeneinander geneigt, ebenso zeigen die Linien a b und c d (Bild 81, Heringsche Täuschung) bei senkrechter Aufsicht deutliche Krümmung, während bei schrägem Aufblicken in

Bild 81.



Richtung der Striche selbst die Parallelität ohne Schwierigkeit festgestellt wird.

Bei bestimmten Beobachtungsbestimmungen, guter Fixation eines bestimmten Punktes, verschwindet die Täuschung. Die bei Ausschaltung der Augenbewegung eintretende Abnahme der Täuschung läßt sich sehr gut bei kurzdauernder Beleuchtung durch einen Funken zeigen.

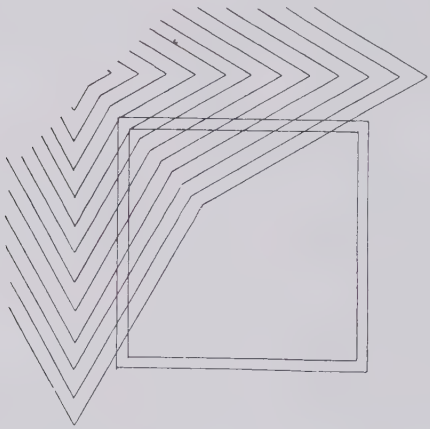
Bei der in Bild 82 wiedergegebenen Poggendorfschen Täuschung, deren Zustandekommen zum Teil auf die Einwirkung der Irradiation in den spitzen Winkeln zurückzuführen ist, zeigt neben einer Abrundung der spitzen Winkel eine Parallelverschiebung der einzelnen Teile der dünnen Linie gegeneinander, eine Erscheinung, die bei Messungen als Fehlerquelle wohl zu beachten ist, wenn die Teilstriche des Maßstabes nicht die gleiche Richtung haben, wie die Konturen des auszumessenden Körpers.

Bild 82.

v. Helmholtz beschreibt noch eine eigentümliche Bewegungserscheinung, die sich einstellt, wenn man mit einer Nadel horizontal von rechts nach links über das Zoellnersche Muster hingleitet und ihr mit dem Blicke folgt. Die eigentümliche Täuschung der Figur wird hierbei noch verstärkt. Am besten gelingt der Versuch, wenn man die Nadelspitze fest fixiert und die Zeichnung unter der Nadel wegführt. Bei Bewegung der Nadel in Richtung der schwarzen Balken wird die Täuschung abgeschwächt.

Von der großen Reihe anderer bekannter Täuschungen, die von Loeb, Bourdon u. a. beschrieben sind, soll hier nur noch eine erwähnt werden, welche ähnlich wie die Heringsche Täuschung zustande kommt. Das über das doppelt umrandete Quadrat (Bild 83) gelegte Linienmuster bewirkt, daß der vom Linienmuster bedeckte Winkel als spitzer und nicht als rechter erscheint, was nach der Heuseschen Erklärungsweise wohl auf den Kontrast zwischen den Winkeln des Liniensystems und dem Winkel der Quadratseiten zu erklären ist, wie überhaupt das Kontrastgesetz lebhaft einwirkt, welches man nach v. Kries

Bild 83.



in der Form aussprechen kann: Überall wo eine Reihe stetig veränderlicher Vorstellungsinhalte in eine Reihe geordnet werden kann (derart, daß der Übergang von je einem zum folgenden Element nur als eine Änderung gleicher Art oder im gleichen Sinne erscheint) finden wir, daß der Eindruck eines einzelnen Elements modifiziert wird, wenn er in zeitlicher oder räumlicher Benachbarung mit einem andern gegeben ist, und zwar derart, daß er in der von diesem andern abgewendeten Richtung verschoben erscheint. Dieser Regel entspricht, daß ein mittleres Grau nach oder neben Schwarz gesehen, heller, nach oder neben Weiß gesehen, dunkler erscheint; nicht minder aber, daß eine parallele Erstreckung neben zahlreichen anderen Eindrücken einer in dem betreffenden Sinne stattfindenden Konvergenz divergierend, neben den von divergenten Linienpaaren konvergierend erscheint.

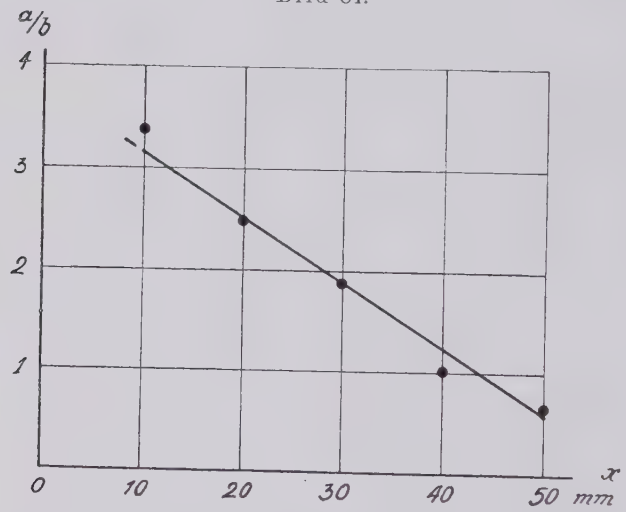
§ 48. Gestalts- und Raumtäuschungen.

So wenig eine strenge Trennung zwischen den Täuschungen des Augenmaßes möglich ist und so fließend die Übergänge von den physiologisch zu begründenden Fehlern zu den Täuschungen sind, so wenig ist es möglich, Gestalts- und Raumtäuschungen unmittelbar zu trennen. Das Vorhandensein irgendwelcher sekundärer Merkmale, wie Schraffierung oder Farbe kann bereits eine wesentliche Veränderung der Form im Gesichtsbilde verursachen. Eine helle Fläche auf dunklem Grunde wird, auch wenn die Irradiation unmerklich bleibt, stärker und aufdringlicher wirken als eine schwarze auf hellem Grunde; ebenso wird eine gelbe oder rote Fläche größer erscheinen als eine blaue gleicher Größe von gleicher subjektiver Helligkeit. Wie weit derartige Eindrücke mitwirken, unter denen auch die Erkennbarkeit von Strukturelementen eine wichtige Rolle spielt, läßt sich nur von Fall zu Fall untersuchen, wobei immer noch auf Einflüsse des Baues der Augen Rücksicht genommen werden muß. Nach Helmholtz muß man beispielsweise die Tatsache, daß vertikale und horizontale Strecken gleicher Größe, die also im gleichen Winkelmaß abgebildet werden, dennoch als verschieden groß beurteilt werden, auf Besonderheiten der Bewegung der Augenmuskel zurückführen, doch könnte man geneigt sein, auch den Erfahrungen eine Bedeutung beizumessen, insofern als Breitendimensionen viel seltener miteinander verglichen werden, als die häufig auftretenden Vertikalabmessungen. Zeichnet man nach dem Augenmaß ein Quadrat auf ein senkrecht zur Blickrichtung gehaltenes Blatt Papier, so wird die vertikale Seite stets kleiner ausfallen, als die horizontale. Neue Versuche haben jedoch gezeigt, daß diese Beobachtung nur für Quadrate richtig ist, die unter größerem Gesichtswinkel erscheinen. Bei sehr kleinen Rechtecken

wird im Gegenteil die wagerechte Seite überschätzt, die vertikale in ihrer Längenausdehnung unterschätzt, so daß stehende Rechtecke vom Seitenverhältnis 1,2 etwa als Quadrate erscheinen. Zwischen beiden findet ein stetiger Übergang statt. Legt man die Bildgröße im Auge für die Kennzeichnung des Gesichtswinkels zugrunde, unter dem die Seiten der Rechtecke erscheinen, so ergibt sich folgendes:

Bildgröße im Auge	Als Quadrate wurden bezeichnet		Verhältnis $\frac{a}{b}$	Mittlere Größe der Rechteckseite, beobachtet in 450 cm Entfernung
	a) stehende Rechtecke	b) liegende Rechtecke		
0,044 mm	77 %	23 %	3,4	10 mm
0,089 „	71 %	29 %	2,5	20 „
0,134 „	65 %	35 %	1,9	30 „
0,178 „	50 %	50 %	1,0	40 „
0,222 „	39 %	61 %	0,65	50 „

Bild 84.



Die zweite und dritte Vertikalreihe geben die Anzahl der Fälle, bezogen auf die Gesamtzahl der Beobachtungen, in denen stehende oder liegende Rechtecke als Quadrate bezeichnet werden. Bei einer Bildgröße von 0,178 mm ist der Fehler auf beide möglichen Fälle gleichmäßig verteilt, es werden demnach, wie aus den Beobachtungen unmittelbar hervorgeht, Quadrate wirklich als solche empfunden. Aus Bild 84, in welchem als Ordinate das Verhältnis $\frac{a}{b}$ der Tabelle, als Abszisse dagegen

die Quadratseite aufgetragen ist, folgt, daß unter Berücksichtigung der Fehler der Wert der Bildgröße 0,178 mm, für den das Verhältnis $\frac{a}{b} = 1$ wird, etwas zu erhöhen ist. Für eine Bildgröße von 0,2 mm etwa werden also Horizontal- und Vertikalabmessungen gleich groß empfunden; in diesem Falle würde das Bild gerade die Netzhautgrube bedecken. Zur Erklärung dieses Verhaltens, welches keineswegs individuell ist, kann man die Heinesche Anordnung der Zapfen heranziehen; ein Versuch, hierfür den in jedem Auge in höherem oder geringerem Maße auftretenden Astigmatismus heranzuziehen, der eine unscharfe und damit verbreiterte Abbildung der horizontalen Seiten bedingt, dürfte nicht völlig ausreichen. Jedenfalls aber sind für die beschriebene Täuschung psychische Einflüsse nicht anzunehmen, im Gegensatz zu den Raumtäuschungen, die in Bild 85 und 86 dargestellt sind. Es gelingt leicht,

Bild 85.

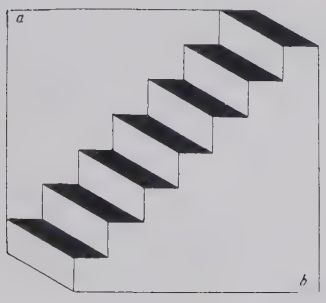
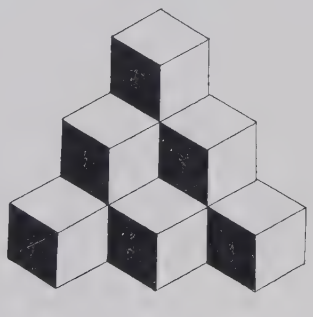


Bild 86.



je nach der Vorstellung, die bei der Betrachtung der rein ebenen Figuren vorherrscht, die mit a bezeichnete Fläche vor oder hinter der mit b bezeichneten zu sehen. Faßt man die Zeichnung als eine in der Aufsicht gegebene Projektion einer Treppe auf, die sich an die Wand a anlehnt, so liegt b vorn; denkt man sich hingegen die Zeichnung als eine von rechts in Untersicht dargestellte Treppe, so erscheint a vorn (Schrödersche Treppe). Eine ähnliche Wirkung weist die vielfach zu Reklamezwecken benutzte Wiedergabe der Neckerschen Würfel auf, die man bald als einen Aufbau von Würfeln, die von rechts oben beleuchtet wird, auffassen kann, bald aber als hohle Form, welche von links unten beleuchtet wird. Der mittelste Punkt ist in einem Falle vertieft, im andern erhaben. Wie schon an anderer Stelle angegeben (S. 103), läßt häufig überhaupt erst die Schattenwirkung eine bestimmte Raumverteilung deutlich hervortreten. Ein mit Schattenwirkung wiedergegebenes Landschaftsbild läßt die körperlichen Formen viel besser erkennen, als eine einfache Strichzeichnung; können doch bei binokularer Betrachtung ebener Darstellungen

die identischen Netzhautbilder, welche beim Betrachten körperlicher Gegenstände stets verschieden sind, leicht zu einer Verringerung des vom Künstler erstrebten Tiefeneindrucks führen, welcher stärker hervortritt, wenn diese Störung durch monokulare Betrachtung ausgeschaltet wird.

Auf eine besondere, in der Literatur viel behandelte Erscheinung sei hier noch hingewiesen, nämlich die Tatsache, daß Mond und Sonne im Zenith kleiner erscheinen als am Horizont. Die verschiedenartigsten Erklärungsversuche sind herangezogen worden, hauptsächlich von der nativistischen Anschauungsweise ausgehend, daß mit der Entfernung eines Gegenstandes auch die Einschätzung seiner linearen Größe nach bestimmten, teils psychisch, teils physiologisch begründeten Gesetzen sich ändert und zwar soll die empfundene lineare Größe von einer bestimmten Entfernung ab stärker abnehmen als der objektiv bestimmte Gesichtswinkel. Da nun am Horizont gleichzeitig irdische Objekte im Gesichtsfeld erscheinen, die eine bessere Schätzung der Entfernung und damit eine bessere Beurteilung der wahren Entfernung der Gestirne ermöglichen, diese also an einem weiter entfernten Orte vermutet werden, als im Falle, wo Vergleichsgegenstände nicht im Gesichtsfelde auftauchen, so werden die Gestirne am Horizont weiter und damit auch subjektiv größer erscheinen können als im Zenith. Neuerdings werden diese u. a. von v. Sterneck in längeren Ausführungen niedergelegten Ansichten von Witte aufgenommen, doch können dessen Beweise nicht in allen Punkten als bindend anerkannt werden, zumal die neuen Beobachtungen und Messungen von Dember und Uibe mit viel einfacheren Annahmen eine physikalisch-physiologische Erklärung gegeben haben, die auch alle früheren Beobachtungen zu deuten imstande ist.

Sie legen die Voraussetzung zugrunde, daß in einer beliebigen Richtung die maximale Sichtweite durch die Entfernung eines Punktes der Atmosphäre vom Auge gegeben ist, von dem aus eine durch Lichtzerstreuung leuchtende Luftmolekel so viel Energie in das Auge sendet, daß gerade noch eine Lichtempfindung zustande kommt. Je nach der Beleuchtung der Atmosphäre, ihrem Gehalt an zerstreuenden Teilchen und der Farbe des Lichtes wird also die Sichtbarkeitsgrenze verschieden ausfallen, läßt sich aber stets durch photometrische Messungen in ihrer Form wiedergeben und die auf Grund der photometrischen Messungen bestimmte Form des sichtbaren Himmelsgewölbes erweist sich als eine Kugelschale, die nur bei besonderer Beschaffenheit der Atmosphäre in eine Helmform übergeht. Setzt man die Winkelentfernung eines beobachteten Punktes vom Zenith ς, die Sichtweite für den Winkel ς bezogen auf diejenige im Zenith S, so ergibt sich aus den Beobachtungen der Himmelshelligkeit:

ς	S	S'
0	1,00	1,00
15	1,02	1,04
30	1,09	1,10
45	1,22	1,24
60	1,42	1,43
75	1,73	1,74
80	1,85	2,05

während die Werte S' die durch Schätzung ermittelten Grenzwerte der relativen Sichtweiten darstellen. Bei Beobachtung durch ein Rotglas erscheint, wie auch durch photometrische Messungen bestätigt wird, das Himmelsgewölbe flacher. Die weitesten Sichtgrenzen in horizontaler Entfernung liegen zwischen 50 und 100 km. Auf dieses Himmelsgewölbe, dessen Form also nicht durch physiologische oder psychologische Ursachen, sondern durch die in verschiedenen Richtungen verschiedene maximale Sichtweite bedingt wird, scheinen die Gestirne sich zu bewegen. Mit dieser Lokalisation der Sonne und des Mondes sind dann ohne weiteres auch die sichtbaren Größenänderungen erklärt. Die stets unter dem gleichen Gesichtswinkel abgebildeten Gestirne müssen also in horizontnahen Richtungen, in denen das scheinbare Himmelsgewölbe etwa doppelt so weit entfernt ist, als im Zenith, auch etwa doppelt so groß erscheinen, so daß also die sichtbaren Größenänderungen von Sonne und Mond ebenfalls auf physikalische Größen und ihre Änderungen zurückgeführt werden können.

Die Erscheinung des Tellermondes, die ebenfalls in der Literatur viel besprochen ist, und schon von Euler einer Behandlung gewürdigt wurde, ist damit freilich noch nicht erklärt. Sie ist bislang nur durch das Einwirken psychischer Vorgänge zu erklären versucht worden und dürfte auch auf physikalische Vorgänge allein nicht zurückzuführen sein.

Das psychologische Moment bei den Eindrücken von der scheinbaren Größe der Gestirne ist von Filchner hervorgehoben, der gezeigt hat, daß für jede Objektgröße ein Abstand (kritischer Punkt) existiert, bis zu dem die wirkliche Größe der Körper richtig beurteilt wird und zwar ist für eine Größe von

0,0005	m	der	Abstand	0,7	m
0,004	„	„	„	1,3	„
0,04	„	„	„	5,5	„
0,1	„	„	„	11,5	„
0,16	„	„	„	18,3	„
0,2	„	„	„	22,5	„
0,35	„	„	„	38,8	„

Jenseits dieser Entfernungen gelegene Objekte werden nach ihrem Bildwinkel beurteilt, also um so kleiner, je ferner sie sind. Für jede Entfernung, die größer ist als 38,8 m, gibt es daher eine bestimmte, mehr als 35 cm betragende Objektgröße, die den Eindruck eines 35 cm großen Gegenstandes hervorruft und zwar ist dies diejenige Objektgröße, die in der betreffenden Entfernung unter einem Sehwinkel von 30 Bogenminuten erscheint. Die Grenze des subjektiven Sehraums, die übrigens auch durch einen direkten Versuch geschätzt wurde, ist demnach mit 40 m anzunehmen und die Einordnung der objektiven Welt in den subjektiven Sehraum würde auch die Größe des „Tellermondes“ erklären.

Das letzte Wort in all diesen Fragen ist noch nicht gesprochen. Vieles würde besser bekannt sein, wenn nicht, ehe noch die Voraussetzungen gehörig geprüft sind, es erkannt werden sollte. Nur in begrenzten Gebieten der physiologischen Optik sind genug Kenntnisse vorhanden, genügend Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten einfacher Art erforscht, um den Weg zu den allgemeinen Gesetzen zu zeigen; aber, je tiefer man eindringt, um so schwierigere Aufgaben bieten sich dar — sie zu lösen, bedarf es mehr als bisher, der Zusammenarbeit von Psychologen, Physiologen und Physikern, die leider bisher mehr gegeneinander als miteinander gearbeitet haben.

Sachverzeichnis.

A — Seite

Abbildung durch Linsen 6
Abklingen der Lichtempfindung . . 91
— farbiges 79
Adaptation 31
Aderhaut 13
Akkommodation 15, 63
Akkommodationsbreite 18
Ansteigen der Lichtempfindung . . 91
Assimilation 75
Astigmatismus 20
Auflösungsvermögen 53
Aufnahmefilter 84
Auge, Bau des — 11
— menschliches 12
— optische Konstanten . . . 12, 17

B

Bewegungsvorgänge 94
Bildfrequenz 96
Blinder Fleck 26
Brechkraft 16
Brechungsanomalien 17
Brechungsgesetz 5
Brechungsverhältnis 2
Brennpunkt 7
Brillengläser, Bestimmung der — . . 20

C

Chorioidea 13
Cornea 12

D

Dioptrie 16
Dissimilation 75
Dunkelspektrum 38

E

Elektrolumineszenzlampen 52
Empiristische Theorie des Sehens . . 127
Empfindlichkeit der Netzhaut . . 30, 37
— örtliche Unterschiede 35
— photometrische 46
Empfindlichkeitskurve 40
— steigerung 33
Energiemenge, geringste 35
Entfernungsmesser 118
Entfernungsschätzung 102

F — Seite

Farbendreieck 69
— halb 72
— hören 90
— kegel 71
— kreisel 88
— mischapparate 85
— mischungen 71
— messapparate 85
— sehen, Theorien 73
— unbunte 71
Farbgläser 49, 65
— töne 66
Fernpunkt 15
— rohr 113, 124
Flächenhelle 78
Florkontrast 81
Fortpflanzungsgeschwindigkeit . . . 2, 4

G

Gestaltstäuschungen 135
Glaskörper 13
Gleiten der Netzhautbilder 100
Gletscherbrand 88
Grau 70
Grenzwinkel, physiologischer . . . 53
Grundempfindungen 75
Grundgesetze der Lichtfortpflanzung . 4

H

Hauptebenen 9
Hefnerkerze 43
Helligkeit optischer Instrumente . . 123
Helligkeitskontrast 80
Hellspektrum 38
Hornhaut 12
Horopterfläche 104
Hyperopie 18

I

Instrumente, binokulare 115
Interferenzphotometer 47
Iris 12
Irradiation 80

K

Kehrbildentfernungsmesser 119
Kernfläche 127

Seite

Kinematographie 94
— farbige 99
Komplementärfarben 67, 81
Kontrastfarben 77
Körperfarben 70

L

Leistungsfähigkeit opt. Instrumente . 119
Licht 1
Lichtempfindung 1
Licht, erborgtes 10
Lichtfortpflanzung 4
— quellen, farbige 48
— strahl 4
— strom 43
— wellen 3
Linse 6
— des Auges 12
Linsenstereoskop 109
Lokalzeichen 127
Luftperspektive 103
Lumen 43
Lux 43

M

Malteserkreuz 97
Meßverfahren, stereoskopische . . . 117
Mikroskop 112
Mutoskop 94
Myopie 18

N

Nachbilder 77
Nachttiere 42
Nahpunkt 15
Nativistische Theorie des Sehens . . 128
Netzhaut 13, 23
Nervenbahnen 28
Nichtselbstleuchtende Körper . . . 10
Noniensehschärfe 58
Nutzeffekt, visueller 50

O

Oekonomie, photometrische 50
Optometer 20

P

Photographie in natürlichen Farben . 82
Photometer 44
Photometrie, objektive 43, 49
— subjektive 43
Photometrische Grundgesetze . . . 42
Presbyopie 18
Purpur 67

Q

Querdisparation 127

R

Radius des stereoskopischen Sehens 105

Seite

Radphänomen 95
Raumbildentfernungsmesser 119
Raumtäuschungen 135
Reflexionsgesetz 5
Regenbogenhaut 12
Reizsummation 126
Reizung, Ursachen der — 27
Retina 13

S

Sättigung der Farben 68
Scheitelrefraktion 16
Schnittbildentfernungsmesser . . . 119
Schwarz 70
Schwellenwert 33, 36
— für Bewegungsgrößen 99
Sehen, binokulares 101
— monokulares 101
— räumliches 126
— stereoskopisches 105
Sehschärfe, Bedeutung für Physik . 59
— Bestimmung 61
Sektorenverhältnis 96
Selbstleuchtende Körper 10
Simultankontrast 80
Sklerotika 12
Spektralfarben 108
Spiegelspektroskop 65
Stäbchen 23
— -sehen 38
— -weiß 40
Stereokomparator 120
Stereoskopische Bilder 106
— —, Wiedergabe 121
Strahlen 2
Stroboskop 94

T

Täuschungen, optische 130
Telestereoskop 111
Tiefenunterscheidung 106

U

Ultrarot, Wirkungen des — 88
Ultraviolett, Wirkungen des — . . . 88
Unterschiedsempfindlichkeit 30

V

Vergrößerung, leere 113
Verschmelzungsfrequenz 92

W

Wahrnehmungsvermögen 53
Weiß 40, 67
Wellenlängen 39, 66
Wiedergabefilter 84

Z

Zapfen 23
— -sehen 38
Zeitlupe 96

Quellenwerke.

Allgemeines.

Gleichen, A., Einführung in die medizinische Optik, Leipzig 1904.
Graefe-Sämisch, v., Handbuch der gesamten Augenheilkunde, Leipzig 1910.
Helmholtz, H. v., Handbuch der physiologischen Optik, 3. Aufl., Hamburg und Leipzig 1909.
Helmholtz, H. v., Vorträge und Reden, Braunschweig 1896.
Lummer, O., Die Lehre von der strahlenden Energie (Optik), Braunschweig 1909.
Lummer, O., Grundlagen, Ziele und Grenzen der Leuchttechnik, München und Berlin 1918.
Nagel, W., Handbuch der Physiologie des Menschen, Bd. 3.

Besonderes.

Abschnitt I.

Kühl, Centralzeitung für Optik und Mech. **40,** 349, 1919.
Lamb, Phil. Mag. (6), **38,** 685, 1919.

Abschnitt II.

Heine, v. Graefes Archiv für Ophthalmologie, **51,** 146, 1900.
Schwertschläger, Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane, **16,** 35, 1898.

Abschnitt III.

Bender, Inaug.-Dissert. Breslau, 1913.
Bloch, Elektrotechnische Zeitschrift 1915, S. 114.
Bloch, Monatsblätter des Vereins deutscher Ingenieure, Nr. 3, 1920.
Conrad, Inaug.-Dissert. Breslau, 1918.
Dauber, Fortschritte der Psychologie, **3,** 102, 1914.
Eder, Wiener Berichte, II a, **128,** 404, 1918.
Exner, F., Wiener Berichte, II a, **128,** 71, 1918.
Gehlhoff und Schering, Zeitschrift für Beleuchtungswesen, **25,** Heft 3/4, 1919.
Guillery, Zeitschrift für Psychol. und Physiol. der Sinnesorgane, **16,** 264, 1898.
Halbertsma, Fabrikbeleuchtung. München und Berlin 1918.
Ives, Phil. Mag. (6), **28,** 708, 1914.
„ „ „ (6), **29,** 319, 344, 1915.
Ives und Kingsbury, Phys. Rev., **6,** 334, 1915.
Karrer, Phys. Rev., **5,** 189, 1915.
Pütter, Die Naturwissenschaften, **8,** 501, 1920.
Schröter, Zeitschrift für Beleuchtungswesen, **26,** 41, 1920.
Schulz, Verh. der Deutschen Phys. Ges., **21,** 227, 1919.
Schulz, Zeitschrift für technische Physik, **1,** 129, 1920.
Seggel, v. Graefes Archiv für Ophthalmologie, **59,** 107, 1904.
Tscherning, Medd. K. Danske Tidensk. Selsk. I, No. 10, 1918.
Voss, Die Naturwissenschaften, **7,** 789, 1919.

Abschnitt IV.

Dorst, Zeitschrift für Instrumentenkunde, **6,** 387, 1886.
Fick, v. Graefes Archiv f. Ophthal., **45,** 337. 1898.
Forster, Procés Verbeaux des Séances de 1878. Comité intern. des poids et mesures. Paris 1879, Anhang III, S. 227.
Hammelsheim, v. Graefes Archiv, **45,** 357, 1898.
Hartmann, Astr. Nachrichten, **155,** 86, 1901.
Hofe, v., Zeitschrift für technische Physik, **1,** 85, 1920.
Humboldt, v., Ansichten der Natur, Bd. 2, S. 38, 1860.
Kienzle, Der Betrieb, **2,** 142, 1920.
Kloth, Deutsche Optische Wochenschrift, 1919, S. 53.
Kritzinger, Sirius, **48,** 3, 35, 1915.
Labitzke, Inaug.-Dissert. Göttingen, 1914.
Leman, Zeitschrift für Instrumentenkunde, **6,** 173, 1886.
Moede, Praktische Psychologie, **1,** 6, 1919.
Noetzli, Das Zielen mit Fernröhren, Zürich 1915.
Reese und Hasselberg, Astrophys. Journ., **15,** 142, 1902.
Reinhertz, Nov. Acta Kais. Leop.-Cor.. Akad. **57,** No. 2, 1893/94.
Ruhstraht, Zeitschrift für Feinmechanik, **27,** 141, 1919.
Schlechtriem und Seeliger, Mitteilungen der Flakscheinwerfer-, Prüf- und Versuchsabteilung Hannover 1918, Heft 2/3.
Schulz, Centralzeitung für Optik und Mechanik 1919, Nr. 31.
Schulz, Zeitschrift für Instrumentenkunde, **39,** 91, 124, 242, 1919.
Smith und Milne, British Journal of Psychol., **3,** 78.
Toussaint, Die Werkzeugmaschine, **22,** 205, 1918.
Tscherning, s. Abschnitt III.
Volkmann, Psychophysik, Bd. 1, S. 211.
Wertheim, Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane, **7,** 172 1894.
Wülfing, Zeitschrift für Biologie, Neue Folge, **11,** 199, 1892.

Abschnitt V.

Abney, Phil. Trans. **193,** A, 259, 1900.
„ „ „ **205,** A, 333, 1906.
Allen, Phil. Mag., (6), **38,** 55, 81, 1919.
Barton und Browing, Phil. Mag., (6), **38,** 338, 1919.
Donath, Die Grundlagen der Farbenphotographie, Braunschweig 1906.
Edridge-Green, Hunterian Lectures on Colour Vision and Colour Blindness, 1912.
Exner, Wiener Berichte IIa, **127,** 1830, 1918.
Göthlin, Svensk. Vetenskapsakad. Handl. Stockholm, **58,** No. 1, 1917.
Halbertsma, s. Abschnitt III.
Heine und Lenz, Das Farbensehen der Kunstmaler, Jena 1907.
Henry, Centralzeitung für Optik und Mechanik, **40,** 3, 14, 24, 34, 46, 1919.
Hess, v., Die Naturwissenschaften, **8,** 197, 1920.
Horn, Technische Mitteilungen für Malerei, 1916, No. 9—11.
Houstoun, Phil. Mag., (6), **38,** 402, 1919.
Hübl, v., Phys. Zeitschrift, **18,** 270, 1917.
Hyde, Forsythe und Cady, Phys. Rev., (2), **14,** 379, 1919.
Iklé, Centralzeitung für Optik und Mechanik, **39,** 177, 267, 1918.
König, Gesammelte Abhandlungen zur physiologischen Optik, Leipzig 1903.
Lodge, Nature, **104,** 92, 1919.

Lukiesh, Color and its applications, New-York 1915.
„ Light and shade and their applications, New-York 1916.
„ The lightning art, New-York 1917.
Nagel, Zeitschrift für Sinnesphysiologie, **41,** Heft 4, 1906.
Oloff, Deutsche Optische Wochenschrift, 1919, S. 5.
Ostwald, Die Farbenfibel, Leipzig 1917.
„ Die Farbenlehre, Leipzig 1918, 1919.
„ Prometheus, **31,** 69, 1919.
Peltzer, Über Malweise und Stil in der holländischen Kunst, Heidelberg 1903.
Pickler, Hypothesenfreie Theorie der Gegenfarben, Leipzig 1919.
Raehlmann, Über Farbensehen und Malerei, München 1901.

Abschnitt VI.

Carpentier, Comptes rendues à l'acad. des sciences, **169,** 889, 1919.
Lassally, Bild und Film im Dienste der Technik, Halle 1919.
Lehmann, Die Kinematographie, Leipzig 1911. (Aus Natur und Geisteswelt.)
Marbe, Theorie der kinematographischen Projektionen, Leipzig 1910.
Merté, Die Naturwissenschaften, **7,** 435, 1919.
„ Zeitschrift für Instrumentenkunde, **39,** 146, 1919.
Metzner, Zeitschrift für wiss. Mikroskopie, **36,** 113, 1920.
Thielemann, Umschau, **24,** 29, 1920.
Weiser, Medizinische Kinematographie, Dresden und Leipzig 1919.

Abschnitt VII.

Arrer, Wundts phil. Studien, **13,** 116, 222, 1896.
Bourdon, Revue phil., **43,** 29, 1897.
Dittler, Stereoskopisches Sehen und Messen, Leipzig 1919.
Dixon, Zeitschrift für Psych. und Physiol. der Sinnesorgane, **7,** 97, 1894.
Geipel, Phys. Zeitschrift, **21,** 169, 1920.
Gleichen, Theorie der modernen optischen Instrumente, Stuttgart 1911.
Greef, Zeitschrift für Psych. und Physiol. der Sinnesorgane, **3,** 21, 1893.
Heine, v. Graefes Archiv für Ophthalm. **51,** 563, 1900.
Hess, Wissen und Leben, 1914, S. 424.
Hillebrand, Zeitschrift für Psych. und Physiol. der Sinnesorgane, **7,** 97, 1894.
„ „ „ „ „ „ „ „ **16,** 71, 1898.
Hofe, v., Fernoptik, Leipzig 1911.
Jentsch, Phys. Zeitschrift, **15,** 56, 1914.
Laqueur und Witte, Phys. Zeitschrift, **19,** 142, 1918.
Parinaud, La vision binoculaire, Annuaire de l'Oculiste, 1897.
Pulfrich, Stereoskopisches Sehen und Messen, Jena 1911.
„ Zeitschrift für Instrumentenkunde, **38,** 17, 1918.
Rohr, v., Die binokularen Instrumente, Berlin 1907.
Schlodtmann, v. Graefes Archiv für Ophthalm., **51,** 256, 1900.
Wächter, Sitzungsber. der Wiener Akad. der Wiss., **55,** 856, 1892.
Weinhold, v. Graefes Archiv für Ophthalm., **59,** 459, 581, 1904.
Witte, Phys. Zeitschrift, **20,** 61, 114, 126, 368, 1919.

Abschnitt VIII.

Auerbach, Zeitschrift für Psych. und Physiol. der Sinnesorgane, **7,** 152, 1894.
Baschin, Die Naturwissenschaften, **7,** 510, 1919.
Dember und Uibe, Ann. d. Phys., (4), **61,** 313, 353, 1920.

Filchner, Arch. f. Anat. und Physiol.; physiol. Abteilung. 1918, S. 197.
Filehne, Sirius **52,** 219, 1919.
Franz, Das Weltall, **20,** 39, 1914.
Grotrian, Phys. Zeitschrift, **18,** 369, 1917.
Haenel, Zeitschrift für Psych. und Physiol. der Sinnesorgane, **51,** 161, 1909.
Jaeckel, Phys. Zeitschrift, **21,** 262, 1920.
Müller, Die Referenzflächen des Himmels und der Gestirne, Braunschweig 1918.
Nagel, Zeitschrift für Psych. und Physiol. der Sinnesorgane, **16,** 373, 1898.
Pozděna, Zeitschrift für Psych. und Physiol. der Sinnesorgane, **51,** 200, 1909.
Wundt, W., Abh. der math. phys. Klasse der Sächs. Akad. der Wiss., **24,** 42, 1898.
Zöllner, Pogg. Ann., **110, 500**, 1860.
Zweifel, Die Naturwissenschaften, **7,** 937. 1919.

Verlag von FERDINAND ENKE in STUTTGART

Die Polarisationsapparate und ihre Verwendung

Von Dr. **Hans Schulz** und Geh. Regierungs-Rat Dr. **A. Gleichen**

Mit 80 Textabbildungen. Lex. 8°. 1919. geh. M. 7.—; in Halbleinw. geb. M. 10.—

Schule der Optik

Für Optiker, Okulisten und zum Gebrauch in optischen und mechanischen Werkstätten

Von Geheimrat Dr. **A. Gleichen** und **A. Klein**

Zweite neubearbeitete Auflage, herausgegeben von **A. Gleichen** und **A. Gerold,** erscheint demnächst.

„Schule der Optik" ist durch Beschluss des Deutschen Optiker-Verbandes das offizielle Lehrbuch der Optikerschule zu Berlin

Die Theorie der modernen optischen Instrumente

Ein Hilfs- und Übungsbuch für Physiker und Konstrukteure optischer Werkstätten sowie für Ingenieure im Dienste des Heeres und der Marine

Von Geheimrat Dr. **Alexander Gleichen**

Mit 260 Fig. u. 109 gelösten Aufgaben. Lex. 8°. 1911. geh. M. 10.80; geb. M. 12.80

Die Optik in der Photographie

In gemeinverständlicher Darstellung

Von Geheimrat Dr. **Alexander Gleichen**

Mit 114 Textabbildungen. gr. 8°. 1911. geh. M. 6.—

Kristalloptik

Eine ausführliche elementare Darstellung aller wesentlichen Erscheinungen, welche die Kristalle in der Optik darbieten, nebst einer historischen Entwicklung der Theorie des Lichts

Von Prof. Dr. **A. Becker**

Mit 106 Abbildungen. gr. 8°. 1903. geh. M. 8.—

Einführung in die Differential- und Integralrechnung für höhere Techniker

Mit Anwendungen aus den wichtigsten Gebieten der technischen Praxis zum Selbstunterricht geeignet

Von Oberlehrer Dipl.-Ing. **Ph. Häfner**

Zweite Auflage erscheint demnächst

Mit vielen Textabbildungen. gr. 8°. 1920

Verlag von FERDINAND ENKE in STUTTGART

Atlas der Kriegsaugenheilkunde

samt begleitendem Text

Von Prof. Dr. **A. v. Szily**

Sammlung der kriegsophthalmologischen Beobachtungen und Erfahrungen aus dem Material der Universitäts-Augenklinik und Lazarette in Freiburg i. Br.

Mit einem Begleitwort

Von Geh. Rat Prof. Dr. **Th. Axenfeld**

Mit 511 Textabbildungen und 77 Tafeln, darunter 65 farbige hoch 4°. 1918. geh. M. 76.—; in Halbleinwand geb. M. 82.—

Der Atlas ist in den Kreisen der Augenärzte und Chirurgen wie seitens der Fachpresse glänzend aufgenommen worden. Derselbe wird als ein Denkmal deutscher wissenschaftlicher Arbeit und deutscher Technik während des Krieges bezeichnet als ein Werk, welches weit über den Krieg hinaus seine Bedeutung bewahren wird

---

Bielschowsky, Prof. Dr. A., **Die Förderung des akademischen Blindenbildungswesens im Kriege.** Mit 9 Abbildungen. Lex. 8°. 1917. geh. M. 1.—.
(Sonderabdruck aus „Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde". 1917. LIX. Band.)

Cramer, Geh.-Rat Dr. E., **Abriss der Unfall und Invaliditätskunde des Sehapparates.** Lex. 8°. 1912. geh. M. 7.—; in Leinw. geb. M. 8.60.

Dahlfeld, Dr. C., **Bilder für stereoskopische Übungen.** Zum Gebrauche für Schielende. I. Teil: Neunte Auflage. 32 Tafeln in Leinwandmappe. 1917. M. 6.—. II. Teil: Zweite Auflage. 30 Tafeln in Leinwandmappe. 1919. M. 8.—. II. nur 20% Sortimenterzuschlag.

Hüttemann, Stabsarzt Dr. R., **Vorschriften über die Sehschärfe bei der Einstellung in verschiedene Berufe.** Ein Nachschlagebüchlein für Ärzte. gr. 8°. 1913. geh. M. 1.60.

Pfalz, Prof. Dr. G., **Die Spruchpraxis des Reichsversicherungsamtes bei Augenverletzungen und Sehstörungen.** Vortrag, gehalten auf der Versammlung Rheinisch-Westfälischer Augenärzte in Düsseldorf am 11. Februar 1912. Lex. 8°. 1912. geh. M. 1.20.

Possek, Prof. Dr. R., **Therapeutische Technik u. Pflege bei Augenerkrankungen.** Mit 66 Textabb. Lex. 8°. 1911. geh. M. 9.-; i. L. geb. M. 11.-.

Straub, Prof. Dr. M., **Der Platz des Bewusstseins in der Theorie des Sehens.** Akademische Festrede 8. Januar 1910. 8°. geh. M. 1.60.

v. Szily, Prof. Dr. A., **Die Anaphylaxie in der Augenheilkunde.** Experimenteller Mitarbeiter Dr. U. Arisawa. Mit 13 Tafeln, darunter 10 farbigen und 4 Textabbildungen. Vorwort von Geh.-Rat Prof. Dr. Th. Axenfeld. Lex. 8°. 1914. geh. M. 24.—.

Uhthoff, Geh.-Rat Prof. Dr. W., **Weitere persönliche Erfahrungen und Betrachtungen zur Kriegsblindenfürsorge.** Lex. 8°. 1917. geh. M. 1.-.

Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde. Unter Mitwirkung zahlr. Fachgenossen herausgeg. von Geh.-Rat Prof. Dr. **Th. Axenfeld** u. Geh.-Rat Prof. Dr. **W. Uhthoff.** Mit farb. Tafeln u. Textabb. Lex. 8°. Preis pro Jahrg. von 12 Heften in 2 Bdn. à M. 40.-.
Im Erscheinen ist der 64. und 65. Band (Jahrgang 1920).

Verlag von FERDINAND ENKE in STUTTGART

Lehrbuch der physikalischen Chemie

Von Dr. **Karl Jellinek**

Professor an der Technischen Hochschule Danzig

—— Vier Bände ——

Erster Band: **Die Lehre von den Aggregatzuständen.** (I. Teil)

XXXVI und 632 Seiten mit 81 Tabellen, 253 Textabbildungen und 4 Bildnissen
Lex. 8°. 1914. geh. M. 24.—

Zweiter Band: **Die Lehre von den Aggregatzuständen.** (II. Teil)

XII und 940 Seiten mit 149 Tabellen, 401 Textabbildungen und 3 Bildnissen
Lex. 8°. 1915. geh. M. 32.—

III. Band: **Die Lehre von dem Aufbau der Materie** (Weltäther, Elektronen, Ionen, Atome und Moleküle), erscheint im Laufe des Jahres 1920

IV. Band: **Die Lehre von den Umwandlungen der Materie** (chemische Statik und Kinetik) **und die Lehre von den Umwandlungen der Energie** (Mechanochemie, Thermochemie, Magnetochemie, Elektrochemie, Photochemie), erscheint im Laufe des Jahres 1921

Theoretische Chemie

vom Standpunkte der Avogadroschen Regel und der Thermodynamik

Von Geh. Rat Prof. Dr. **W. Nernst**

Achte bis zehnte Auflage

Mit Textabbildungen. Lex. 8°. geheftet und gebunden
Erscheint im Laufe des Jahres 1920

Leitfaden der theoretischen Chemie

Als Einführung in das Gebiet für Studierende der Chemie, Pharmazie und Naturwissenschaften, Ärzte und Techniker

Von Prof. Dr. **W. Herz**

Mit Textabbildungen. Lex. 8°
Die zweite Auflage erscheint im Sommer 1920

Handbuch der präparativen Chemie

Ein Hilfsbuch für das Arbeiten im chemischen Laboratorium

Unter Mitwirkung verschiedener Fachgenossen herausgegeben

von Prof. Dr. **Ludwig Vanino**

Kustos am Kgl. Laboratorium des Staates zu München

—— Zwei Bände ——

I. Band: **Anorganischer Teil.** Mit 82 Textabbildungen. Lex. 8°. 1913. geh. M. 18.—; in Halbleinw. geb. M. 24.—

II. Band: **Organischer Teil.** Mit 26 Textabbildungen. Lex. 8°. 1914. geh. M. 22.60; in Halbleinw. geb. M. 28.60

Verlag von FERDINAND ENKE in STUTTGART

Chemische Technologie der Neuzeit

Unter Mitarbeit hervorragender Fachmänner herausgegeben von
Dr. **Otto Dammer,** Berlin

In zweiter Auflage herausgegeben von
Prof. Dr. **Franz Peters,** Berlin

Vier Bände. Lexikon-Oktav
Die zweite Auflage befindet sich in Vorbereitung

Handbuch der chemischen Technologie

Unter Mitwirkung hervorragender Männer der Wissenschaft und Praxis herausgegeben von
Dr. **Otto Dammer**

Fünf Bände. Lex. 8°. 1895—1898. Mit 1272 Textabbildungen
Preis geheftet M. 100.—

Das Materialprüfungswesen

unter besonderer Berücksichtigung der am Kgl. Materialprüfungsamt zu Berlin-Lichterfelde üblichen Verfahren im Grundriss dargestellt

Unter Mitwirkung von
A. MARTENS
Geh. Oberregierungsrat Prof. Dr.-Ing. h. c., Mitglied der Akademie der Wissenschaften, Direktor des Kgl. Materialprüfungsamtes zu Berin-Lichterfelde
sowie von zahlreichen Fachgenossen
herausgegeben von
weil. Prof. Dr. **F. W. Hinrichsen**

Mit 215 Textabbildungen. Lex. 8°. 1912. geh. M. 18.—; geb. M. 20.—

Handbuch der physikalisch-chemischen Technik

für Forscher und Techniker

Von Prof. Dr. **Kurt Arndt**
an der K. Technischen Hochschule zu Berlin

Mit 644 Textabbild. Lex. 8°. 1915. geh. M. 28.—; in Halbleinw. geb. M. 31.—

Handbuch der analytischen Chemie

Von Geh. Rat Prof. Dr. **A. Classen**

—— Zwei Teile ——

I. Teil: **Qualitative Analyse**
Siebente Auflage
Mit 1 Spektraltafel. gr. 8°. 1919. geh. M. 20.—; geb. M. 23.—

II. Teil: **Quantitative Analyse**
Sechste, ganz umgearbeitete und vermehrte Auflage
Mit 56 Holzschnitten. gr. 8°. 1912. geh. M. 13.—; geb. M. 15.—

Verlag von FERDINAND ENKE in STUTTGART

Lehrbuch der Physik für Studierende

Von Geh. Rat Prof. Dr. **H. Kayser**

Fünfte, verbesserte Auflage

Mit 349 Textabbildungen. Lex. 8°. 1916. geh. M. 13.40; geb. M. 15.80

Repetitorium der Experimentalphysik

für Pharmazeuten, Mediziner und Studierende der Naturwissenschaften

Von Dr. **Johannes Wiesent**

Assistent für Physik an der Universität München

Mit 67 Textabbildungen. gr. 8°. 1917. geh. M. 6.—; in Leinw. geb. M. 8.—

Fürstenau, Dr. R., **Leitfaden der Röntgenphysik.** Vorträge über die physikalischen Grundlagen der Röntgenapparate. Mit 61 Abbildungen. Lex 8°. 1910. geh. M. 3.—

Greinacher, Privatdozent Dr. H., **Die neueren Strahlen.** Radium-(α-β-γ)Strahlen, Kathoden-, Kanal-, Anoden-, Röntgenstrahlen. In leichtfasslichen Einzeldarstellungen. Mit 66 Abbildungen. Lex. 8°. 1909. geh. M. 4.—

P. Drudes Physik des Äthers auf elektromagnetischer Grundlage. Zweite, umgearbeitete Auflage. Neu bearbeitet von Prof. Dr. W. König Mit einem Bildnis P. Drudes und 86 Textabbildungen. Lex. 8°. 1912. geh. M. 16.—

Kunz, Privatdozent Dr. J., **Theoretische Physik auf mechanischer Grundlage.** Mit 291 in den Text gedruckten Abbildungen. Lex. 8°. 1907. geh. M. 12.—

Mie, Prof. Dr. G., **Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus.** Eine Experimentalphysik des Weltäthers für Physiker, Chemiker, Elektrotechniker. Mit Textabbildungen. Lex. 8°. geheftet und gebunden. Die zweite Auflage erscheint im Laufe des Jahres 1921

Wiesent, Dr. J., **Die neuesten Fortschritte in der Erkenntnis der Eigenschaften der Materie** (Radioaktivität und Röntgenspektroskopie). Leichtfasslich dargestellt. Mit 6 Texttafeln und 8 Textabbildungen. gr. 8°. 1918. geh. M. 2.—

Wiesent, Dr. J., **Die Fortschritte der drahtlosen Telegraphie und ihre physikalischen Grundlagen.** Mit 15 Abbildungen. gr. 8°. 1919. geh. M. 1.60

Zenneck, Prof. Dr. J., **Elektromagnetische Schwingungen und drahtlose Telegraphie.** Mit 802 in den Text gedruckten Abbildungen. Lex. 8°. 1905. geh. M. 28.—

Lehrbuch der drahtlosen Telegraphie

Von Dr. **J. Zenneck**

ord. Professor der Physik an der Technischen Hochschule in München

Mit Textabbildungen und zahlreichen Tabellen. Lex. 8°

Die fünfte Auflage erscheint im Laufe des Jahres 1920

Verlag von FERDINAND ENKE in STUTTGART

Allgemeine Elektrotechnik

Von Geh. Rat Prof. Dr. **E. Kittler**
unter Mitwirkung von Prof. Dr.-Ing. **W. Petersen**

—— **Drei Bände** ——

II. Band: **Einführung in die Wechselstromtechnik. Transformatoren**
Mit 358 Textabbild. Lex. 8°. 1909. geh. M. 18.—; in Halbleinw. geb. M. 25.—

III. Band: **Wechselstrommaschinen**
Synchron- und Asynchronmaschinen. Einankerumformer. Kollektormotoren
Von Prof. Dr.-Ing. **W. Petersen**
Mit 425 Textabbild. Lex. 8°. 1910. geh. M. 20.–; in Halbleinw. geb. M. 27.—
In Vorbereitung befindet sich: I. Band: **Gleichstrom.** Mit zahlreichen Abbildungen

Hochspannungstechnik

Von Prof. Dr.-Ing. **W. Petersen**
Mit zahlreichen Textabbildungen. Lex. 8°. geheftet und in Leinwand gebunden
Die zweite, umgearbeitete Auflage erscheint im Herbst 1920

Wirkungsweise und Entwurf der Motor-Elektrizitätszähler

Von Dr.-Ing. **Karl Schmiedel,** Charlottenburg
unter Mitarbeit von Dipl.-Ing. **Fr. Estel,** Berlin
Mit 99 Textabbildungen. Lex. 8°. 1916. XII und 167 Seiten. geh. M. 7.—

Materialprüfungsmethoden im Elektromaschinen- und Apparatebau

Von Dipl.-Ing. **K. A. Schreiber**
Mit 162 Textabbildungen. Lex. 8°. 1915. geh. M. 12.—

Theorie, Berechnung und Untersuchung von Transformatoren

Von Dipl.-Ing. **K. A. Schreiber**
Mit 147 Textabbildungen und 1 Tafel. Lex. 8°. 1912. geh. M. 8.40

Auf alle in 1919 erschienenen Werke kommt ein Verlagsteuerungszuschlag von 100 %.

28.C.103.
Das Sehen : eine Einfuhrung in 1920
Countway Library BEV3302
3 2044 046 057 592

28.C.103.
Das Sehen : eine Einfuhrung in 1920
Countway Library BEV3302
3 2044 046 057 592